



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní



APLIKACE MIKROTOMOGRFIE V TEXTILNÍ METROLOGII

APPLICATION OF MICROTOMOGRAPHY IN THE TEXTILE METROLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

STUDIJNÍ PROGRAM: N3106 TEXTILNÍ INŽENÝRSTVÍ
STUDIJNÍ OBOR: TEXTILNÍ A ODĚVNÍ TECHNOLOGIE

Autor práce

Bc. Katarína Dóczyová

Vedoucí práce

Ing. Viera Glombíková, Ph.D.

POČET STRAN TEXTU	98
POČET OBRÁZKŮ	73
POČET TABULEK.....	30
POČET PŘÍLOH.....	6

LIBEREC 2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Katarína Dóczyová**
Osobní číslo: **T11000022**
Studijní program: **N3106 Textilní inženýrství**
Studijní obor: **Textilní a oděvní technologie**
Název tématu: **Aplikace mikrotomografie v textilní metrologiii**
Zadávací katedra: **Katedra oděvnictví**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Rešerše zaměřená na obecnou charakterizaci mikrotomografických zařízení pro nede-
struktivní rentgenografii a využití těchto zařízení v oblasti textilní metrologie zejména
pro hodnocení fyziologických vlastností oděvních materiálů.
2. Experiment zaměřený na aplikaci mikroCT zařízení pro získání 3D obrazu struktury
vytipovaného textilního materiálu a následné provedení analýzy vztahu parametru "3D"
porozity testovaného materiálu (vyhodnoceného pomocí mikro CT) versus parametr
odolnosti daného materiálu vůči prostupu vzduchu (parametr získaný měřením pomocí
klasických normovaných metod)
3. Vyhodnocení kladů a záporů využití micro CT zařízení jako alternativní metody hod-
nocení propustnosti vzduchu skrze textilní materiál.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- Ramaswamy, S., Gupta, M., Goel, A., Aaltosalmi, U., Kataja, M., Koponen, A., Ramarao, B. V. The 3D structure of fabric and its relationship to liquid and vapor transport, Colloids and Surfaces A: physicochem. Eng. Aspect 241, 2004, p.323-333
- Song, G., Improving Comfort in Clothing, Woodhead Publishing in textiles, 2011
- Platné normy ČSN ISO EN
- Odborné a vědecké časopisy

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Viera Glombíková, Ph.D.


Katedra oděvnictví

Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2013**


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka

L.S.


doc. Ing. Antonín Havelka, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2012

PREHLÁSENIE

Bola som oboznámená s tým, že na moju diplomovú prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, hlavne § 60 – školské dielo.

Beriem na vedomie, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mojich autorských práv používaním mojej diplomovej práce pre vnútornú potrebu TUL.

Ak použijem diplomovú prácu, alebo poskytnem licenciu k jej využitiu, som si vedomá povinnosťou informovať o tejto skutočnosti TUL; v tom prípade má TUL právo odo mňa požadovať úhradu nákladov, ktoré vynaložila na vytvorenie diela až do jej skutočnej výšky.

Diplomovú prácu som vypracovala samostatne s použitím uvedenej literatúry a na základe konzultácií s vedúcim diplomovej práce.

V Liberci dňa 23. 5. 2013

.....

Podpis

Pod'akovanie:

Týmto by som sa chcela poďakovať mojej vedúcej práce Ing. Vieri Glombíkovej Ph.D.za jej odborné rady a konštruktívne pripomienky. Za to, že ma posúvala svojimi názormi vždy ďalej a ďalej s každou konzultáciou. Ďalej moja veľká vďaka patrí Ph.D. Marcele Kolínovej a Ing. Jánovi Palatovi, za ich trpezlivú pomoc pri meraní na μ CT. Chcem sa poďakovať taktiež mojej rodine a priateľom, ktorí mi verili a podporovali ma počas celého štúdia.

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá aplikáciou počítačovej mikrotomografie (μ CT) v textilnej metrológii. Zameriava sa na charakterizáciu mikrotomografických zariadení pre nedeštruktívnu röntgenografiu a využitie týchto zariadení v konkrétnych oblastiach textilnej metrológie. V úvode teoretickej časti je popísaný vývoj a história RTG žiarenia cez klasickú röntgenológiu až po počítačovú tomografiu využívanú v zdravotníctve a mikrotomografiu využívanú v priemyselných aplikáciách. Ďalšou súčasťou je taktiež popis skúmaného materiálu a to konkrétne záťažnej pleteniny určenej na výrobu pracovných ochranných tepluvzdorných rukavíc. Práca sa zameriava taktiež na popis konkrétneho prístroja Skyscan 1174. V experimentálnej časti práce boli pomocou tohto prístroja skúmané fyziologické vlastnosti odevných materiálov a to už spomínanej záťažnej pleteniny a jej porozita. Závislá vlastnosť porozity - priepustnosť vzduchu - bola vyhodnotená klasickou normovanou metódou. Na základe získaného 3D obrazu štruktúry tejto pleteniny bola následne prevedená analýza vzťahu 3D porozita & parameter odolnosti daného materiálu voči prestupu vzduchu. Získaný údaj o 3D porozite z prístroja Skyscan 1174 bol porovnávaný s výsledkami meraní prevedenými štandardnými metódami.

KLÚČOVÉ SLOVÁ:

RTG žiarenie, počítačová mikrotomografia (μ CT), Skyscan 1174, 3D porozita, priepustnosť vzduchu, záťažná pletenina

Abstract

This diploma thesis deals with application of computed microtomography (μ CT) in the textile metrology. Thesis focuses on the characterization of micro tomographic devices intended for the nondestructive X-ray photography and it's use in the specific fields of textile metrology. The beginning of the theoretical part describes the evolution and history of the X-ray radiation from the classical X-ray photography to computed tomography which is used for the medical and also for industrial applications. Next section is dedicated to the description of the chosen material which is weft knitted fabric used for the manufacturing of the heat resistant protective work gloves.

This thesis also focuses on the description of a particular device Skyscan 1174. In the experimental part, physiological attributes (mainly porosity) - of knitted material were investigated by Skyscan 1174. Dependent attributes of the porosity - air permeability – were evaluated by conventional standard methods. Based on the obtained 3D image of the fabric structure, an analysis of the 3D porosity and her relationship with air permeability was subsequently made. The 3D porosity data made by Skyscan 1174 were compared with the results calculated by standard methods.

KEY WORDS:

X-ray radiation, computed micro- tomography (μ CT), Skyscan 1174, 3D porosity, air permeability, weft knitted fabric

Zoznam skratiek a značiek

μ CT	- mikro počítačová tomografia
RTG žiarenie	- röntgenové žiarenie
X-ray	- lúče X
3D zobrazovanie	- trojdimenzionálne zobrazovanie
NDT	- non- destructive testing (nedeštruktívne testovanie)
CAD	- computer-aided design
2D zobrazovanie	- dvojdimenzionálne zobrazovanie
ROI	- oblasť záujmu (region of interest)
VOI	- objem záujmu (volume of interest)
CTvox	- CT objemový program na zobrazovanie a manipulovanie s 3D modelmi a vytváranie videí
STL	- Standard Triangle Language
RP	- rapid prototyping – 3D tlač
FEM	- finite element modeling
HU	- Hounsfieldová stupnica
SEM	- scanning electron microscope
sl	- stĺpik pleteniny
ř	- riadok pleteniny
oj	- ihlový oblúčik očka pleteniny
st	- stvol očka pleteniny
op	- platinový oblúčik očka pleteniny
Hs	- hustota stĺpikov pleteniny
Hr	- hustota riadkov pleteniny
Hc	- celková hustota pleteniny
a	- rozteč riadkov pleteniny [cm]
b	- rozteč stĺpikov pleteniny [cm]
l	- dĺžka nite v očku pleteniny [cm]
d	- priemer nite [cm]
Z	- zakrytie pleteniny [%]
μ	- zaplnenie
V	- objem vlákien [cm ³]
Vc	- celkový objem TVÚ [cm ³]

TVÚ	- textilný vlákenný útvar
T_0	- hrúbka pleteniny [mm]
S_r	- súčet pločných rezov filamentov
S_c	- celková rezná plocha multifilovej nite
ρ	- hustota vlákien [kg/m^3]
γ	- hustota vlákenného útvaru [kg/m^3]
V_p	- objem pórov (vzduchu) [cm^3]
ψ	- porozita [%]
ψ_p	- porozita pletenín [%]
V_{priadze}	- objem priadze v 1 základnej štruktúrnej jednotke pleteniny [cm^3]
$V_{\text{celkový}}$	- objem 1 základnej štruktúrnej jednotky pleteniny [cm^3]
CTan	- CT analyzačný program na zobrazovanie dát, na ich analýzu a tvorbu 3D modelu
CTvol	- CT objemový program na zobrazovanie a manipulovanie s 3D modelmi a vytváranie videí
M	- plošná hmotnosť [g/m^2]
m	- hmotnosť skúšobnej vzorky [g]
A	- plocha skúšobnej vzorky [cm^2]
KES	- Kawabata Evaluation System
P_m	- maximálny tlak [N/m^2]
S	- obsah základnej štruktúrnej jednotky pleteniny [cm^2]
C	- počet riadkov na 1 cm
W	- počet stĺpikov na 1 cm
p_o	- optická porozita [%]

Obsah:

Úvod.....	10
2 Teoretická časť.....	11
2.1 História röntgenového žiarenia.....	11
2.2 Počítačová tomografia	12
2.2.1 História počítačovej tomografie.....	12
2.2.2 Počítačová tomografia v súčasnosti.....	13
2.2.3 X-ray mikro počítačová tomografia (μ CT).....	15
2.2.3.1 Princíp priemyselných CT	16
2.2.3.2 Využitie metrotomografie.....	18
2.2.3.3 Rozmerová analýza.....	19
2.3 Skyscan 1174	21
2.3.1 Parametre snímania:.....	22
2.3.2 Analyzačný program CTan.....	23
2.3.2.1 Štrukturálne parametre merané pomocou Skyscan™ CT-analyzer software.....	24
2.3.3 Program CTvox - realistická 3D vizualizácia.....	28
2.4 Využitie mikrotomografických CT zariadení v oblasti textilnej metrológie.....	29
2.4.1 Distribúcia a transport vlhkosti v textilných vrstvách	29
2.4.2 Zostavenie objemového modelu vzhľadom textílie.....	31
2.4.3 Analýza štruktúry pletenín a tkanín	33
2.4.4 Charakteristika variability v 3D textilnej architektúre	35
2.4.5 Výstup z mikro CT ako vstup pre rapid prototyping a FEM.....	37
2.4.6 Stanovenie porozity pomocou mikro CT & rôzne experimentálne techniky stanovenia porozity	39
2.5 Skúmaný materiál	42
2.5.1 Záťažná pletenina.....	44
2.5.2 Zaplnenie a porozita textílií	46
2.5.2.1 Zaplnenie	48
2.5.2.2 Porozita	50
2.6 Klasické metódy hodnotenia priedušnosti vzduchu.....	51
2.6.1 Prístroj FX 3300.....	52
3 Experimentálna časť	53
3.1 Meranie porozity pomocou mikro CT SkyScan 1174	53
3.1.1 Horizontálne upevnenie textilnej vzorky.....	55
3.1.1.1 Postup vyhodnocovania scanov v programe CTan.....	56
3.1.1.2 Vzorka č.1 – horizontálne umiestnená.....	61
3.1.1.3 Vzorka č.2 – horizontálne umiestnená.....	65
3.1.1.4 Vzorka č.3 – horizontálne umiestnená.....	68
3.1.1.5 Celková porozita materiálu – výsledky z troch vzoriek	70
3.1.2 Vertikálne upevnenie textilnej vzorky	71
3.1.2.1 Nevýhody analýzy vertikálne umiestnenej vzorky.....	76
3.2 Význam hodnotenia 3D porozity.....	76
3.2.1 2D & 3D porozita	77
3.2.2 Výstup z μ CT do RP.....	79
3.3 Teoretický výpočet porozity pleteniny	80
3.3.1 Parametre pleteniny	80
3.3.1.1 Plošná hmotnosť	80
3.3.1.2 Hrúbka pleteniny.....	81

3.3.1.3 Rozteč riadkov a stĺpikov (a, b)	82
3.3.1.4 Počet stĺpikov a riadkov na 1 cm	82
3.3.1.5 Rozmery 1 základnej štruktúrnej jednotky pleteniny zistené pomocou obrazovej analýzy	84
3.3.1.6 Efektívny priemer priadze	85
3.3.1.7 Dĺžka očka	86
3.3.1.8 Plošné zakrytie pleteniny	87
3.3.2 Zisťovanie porozity pomocou obrazovej analýzy.....	88
3.3.3 Výpočet zaplnenia a porozity pleteniny.....	90
3.4 Vzťah porozity & priepustnosti vzduchu v pleteninách	91
4. Diskusia výsledkov	93
4.1 Záverečné porovnanie výsledkov porozity	95
5. Záver	96
6. Použitá literatúra	98
7. Zoznam použitých obrázkov:.....	101
8.Prílohy.....	103
8.1 Príloha A	103
8.2 Príloha B	105
8.3 Príloha C	106
8.4 Príloha D	107
8.5 Príloha E	108
8.6 Príloha F.....	110

Úvod

Porozita textílií predstavuje kľúčový parameter pri hodnotení priedušnosti materiálu. Priepustnosť vzduchu patrí k dôležitým faktorom ovplyvňujúcim komfort daného textilného výrobku, a preto je pomerne podstatné vykonávať skúšky priepustnosti vzduchu. Avšak priepustnosť vzduchu je vlastne funkciou porozity materiálu, preto údaj o porozite predstavuje cennú informáciu

V súčasnosti existuje niekoľko metód ako porozitu materiálu zistiť. Jednu z najnovších, no zatiaľ nie veľmi používaných metód na zisťovanie tohoto parametru predstavuje X-ray počítačová mikrotomografia (μ CT). Objav RTG žiarenia spôsobil veľký prevrat vo vede a výskume v mnohých oblastiach života. Prakticky umožnil nahliadnuť do vnútornej štruktúry 3D objektov, či už ide o ľudské telo, alebo o rôzne predmety či dokonca textilné štruktúry. Zahájil sa tým nový vek štruktúrnej analýzy.

Táto práca pojednáva o využití RTG žiarenia v priemyselnom mikrotomografe Skyscan 1174 na účely hodnotenia textílií v oblasti textilnej metrológie, resp. na ich vnútornú analýzu a vyhodnotenie fyziologických vlastností textílií. Či už ide o analýzu štruktúry textílií, charakteristiky variability v 3D textilnej architektúre, alebo o rôzne výskumy distribúcie a transportu vlhkosti v textilných vrstvách, CT prístup predstavuje pokročilú a presnú metódu hodnotenia.

Hlavným cieľom teoretickej časti tejto práce je vykonať prieskum využitia mikrotomografických zariadení v oblasti textilnej metrológie, pri hodnotení rôznych fyziologických vlastností ako aj obecná charakterizácia zariadení. Experimentálna časť práce sa ďalej zaoberá analýzou zvoleného materiálu pomocou mikrotomografie v dostupných 3D programoch na analýzu a ďalšie spracovanie nameraných dát. Následne bude vykonaná analýza vzťahu 3D porozity materiálu verzus parameter odolnosti daného materiálu voči prestupu vzduchu.

Pre daný experiment bola zvolená záťažná pletenina z nomexových a kevlarových vlákien využívaná na výrobu tepelne odolných pracovných rukavíc. Pretože štruktúra pleteniny je pomerne nestabilná a variabilná, teoretické modely nie sú vždy schopné tento fakt dostatočne zohľadniť a správne vyhodnotiť. Hodnotenie štruktúry pleteniny je pomerne zložité a preto sa v experimentálnej časti práce zaoberáme výhodami použitia CT analýzy porozity v porovnaní s klasickými metódami. Výsledky z CT 3D analýzy budú porovnávané práve s teoreticky vypočítanou

porozitou. Taktiež bude nutné pred samotným meraním na CT navrhnúť najvhodnejšiu metódu uchytenia textilnej vzorky do držiaka, ako aj stabilizáciu jej tvaru pri meraní.

2 Teoretická časť

2.1 História röntgenového žiarenia

Vôbec prvá Nobelova cena za fyziku bola udelená v roku 1901 Wilhelmovi Conradovi Röntgenovi (Obr.1), šesť rokov po jeho objave záhadných lúčov budených zväzkom elektrónov pri dopade na anódu, ku ktorému ho priviedlo štúdium elektrických prúdov v evakuovanej výbojovej trubici. Lúče, ktoré prechádzajú materiálmi neprepúšťajúcimi svetlo, nazval W.C. Röntgen lúčmi X. V niektorých krajinách, najmä európskych, sú tiež nazývané po svojom objaviteľovi. Objav lúčov X vyvolal senzáciu a čoskoro po ňom nasledoval rad detailnejších lekárskejších a fyzikálnych výskumov. V lekárskej i materiálnej diagnostike spôsobil obrovský prielom [1]. Röntgenové zobrazovanie založené na zákone absorpcie röntgenového žiarenia čiže röntgenografie (dvojrozmerná röntgenová tieňografia) sa stalo prvou základnou metódou štruktúrnej analýzy. O mnoho rokov neskôr röntgenografiu doviedla k dokonalosti röntgenová počítačová tomografia. Tá dosiahla takej technickej úrovne, že prístroje využívajúce mnoholúčovú projekciu a počítačové spracovanie nameraných dát umožňujú detailné priestorové (trojrozmerné) zobrazenie vnútornej štruktúry ľudského tela alebo častí priemyselných výrobkov. Nasledujúci objavy, ktoré postupne odhaľovali zákonitosti interakcie röntgenového žiarenia s látkou a optické vlastnosti materiálov v röntgenovej oblasti, sa (popri aplikáciách v medicíne a v biológii) stali základom spektrálnej a difrakčnej materiálnej analýzy [2]



Obr. 1 W.C. Röntgen a jedna z jeho prvých X-ray snímiek zobrazujúca kosti ruky jeho manželky aj so snubným prsteňom [3]

2.2 Počítačová tomografia

2.2.1 História počítačovej tomografie

Objavom röntgenového žiarenia koncom 19. storočia sa lúče X začali využívať hlavne na diagnostiku a kontrolu ľudskému oku nedostupných miest. Významnou vlastnosťou tohto žiarenia je práve prechod tuhými látkami. V závislosti na absorpčných vlastnostiach látky a kumulovanej hrúbke cez ktorú lúče X prenikajú sa znižuje intenzita žiarenia vychádzajúceho za skúmaným telesom. Takýmto spôsobom je možné diagnostikovať napríklad chyby v materiáloch, kontrolovať vnútorné orgány ľudského tela prípadne kontrolovať obsah batožiny na letiskách.

Až zdokonalenie výpočtovej techniky na konci 60. a začiatku 70. rokov 20. storočia umožnilo začať využívať röntgenové žiarenie pre trojrozmernú diagnostiku pre medicínske účely. Týmto sa začal datovať aj vznik RTG počítačovej tomografie. Vďaka počítačovej tomografii (CT – computed tomography) bolo možné vytvárať virtuálne rezy objemovým modelom snímaného telesa bez jeho reálnej deštrukcie. Počítačová tomografia si našla najprv využitie najmä v oblasti medicíny. V priebehu niekoľkých rokov sa začala hojne využívať a tým bol urýchlenný aj proces jej zdokonaľovania. Vývojom sa postupne zvyšuje obrazová kvalita a rozlíšenie, znižuje radiačná záťaž a skracuje rýchlosť vyšetrenia [4].

Metóda počítačovej mikrotomografie pracuje vo dvoch po sebe nasledujúcich etapách. V prvej dochádza k postupnému presvecovaniu rotujúceho objektu RTG žiarením

a zozbieraní veľkého množstva „surových“ dát v podobe dvojdimenzionálnych projekcií. Druhú fázu predstavuje tomografická 3D rekonštrukcia projekcií, ktorá umožňuje vyhotoviť unikátne 3D animácie [5].

V posledných rokoch sa počítačová tomografia prebojovala aj do oblasti priemyselnej. Priemyselné CT prístroje sú koncipované odlišne než medicínske tomografy. Nakoľko snímané súčiastky majú poväčšine tuhú štruktúru, nie je nutné, aby boli v statickej polohe (kedy rotuje detektor a röntgenka) a tiež nie je potrebné tak výrazne obmedzovať radiačné zaťaženie.

2.2.2 Počítačová tomografia v súčasnosti

Dnešná X-ray počítačová tomografia (CT) nachádza uplatnenie v troch hlavných oblastiach. História CT skenerov pre medicínske zobrazovanie, ako už bolo zmienené vyššie, siaha už do ranných 70 rokov minulého storočia (okolo 1970). V roku 1969 postavil víťaz Nobelovej ceny – Hounsfield, prvý skener a v októbri 1971 bola uskutočnená prvá snímka pacientovho mozgu v nemocnici Atkinson Morley Hospital, vo Wimbledone [6].

Od roku 1980 sa táto metóda stávala čoraz populárnejšou v oblasti materiálovej analýzy a nedeštruktívneho testovania – tzv. (NDT non-destructive testing) napr. pri študovaní vnútornej štruktúry materiálov (napr. plasty s vlákennou výstužou) a na detekciu ich závad. Komory počítačových tomografov (CT) sú často malé a určené k študovaniu vzoriek vyrezaných z väčšieho objektu. Avšak v súčasnosti CT technológia vstupuje do sféry objemovej metrológie ako alternatíva k dotykovým alebo optickým 3D meracím súradnicovým prístrojom, meracím ramenám atď. vid'. Obr.2.



Obr. 2 rôzne prístroje na skúmanie vnútorných a vonkajších štruktúr [6]

Prvé pokusy uskutočniť rozmerové meranie za použitia existujúceho CT sa objavilo okolo roku 1991, ale presnosť nebola lepšia ako 0,1 mm. Dôležitý prelom prišiel v roku 2005, keď prvé CT určené na rozmerové meranie, bolo vystavené na Control Fair v Nemecku. Od tej chvíle niekoľko iných predajcov týchto prístrojov začalo ponúkať väčšie a výkonnejšie priemyselné CT schopné merať a ožarovať celú pracovnú vzorku veľkého objemu a hmoty. Doteraz je rozmerová CT metrológia jediná technológia schopná merať ako vnútornú, tak i vonkajšiu geometriu komponentov bez potreby prerezania a deštrukcie vzorky. Je to zároveň jediná technológia pre priemyselnú kvalitatívnu kontrolu súčiastok s neprístupnými vnútornými komponentami, alebo súčiastok s viaczložkovými komponentami (Obr. 3).



Obr. 3 zobrazenie súčiastok s neprístupnými vnútornými komponentami pomocou μ CT [6]

Ako sa uvádza v článku [6], príchod týchto výrobných metód podporujúcich trend zlučovania viacerých zložiek a pohyblivých častí s komplexnou vnútornou geometriou alebo viaczložkové komponenty, sú hlavným podnetom pre zvyšovanie dopytu po tejto rozmerovej CT metrológii: priemysel už viac nemôže akceptovať, aby tieto zložité súčiastky vytvárané aditívnou výrobou alebo multimateriálovým vstrekovaním unikli geometrickej kontrole a kontrole prípustných odchýlok len kvôli tomu, že by neexistovala nedeštruktívna metóda, ktorá by zmerala vnútornú geometriu. Rozmerová CT metrológia je taktiež zaujímavá pre kvalitatívnu kontrolu súčiastok v zmontovanom stave, pretože geometria a rozmery komponentov sa môžu odlišovať v nezmontovanom a v zmontovanom stave. Tým, že je CT bezkontaktná meracia technika, sa stáva konkurenciou pre iné nové bezkontaktné metódy kvalitatívnej inšpekcie, ako napr. FRINGE PROJECTION, laserové scannery.

Ďalšou hlavnou výhodou priemyselnej CT technológie je, že dovoľuje vykonávať rozmerovú kvalitatívnu kontrolu a materiálovú kvalitatívnu kontrolu súčasne. Na obr. 2 nebolo CT meranie použité iba na kontrolu geometrických odchýlok, ale zároveň bola kontrolovaná aj kvalita skleneného zvaru a porozita v žiarovke a objímke [6].

2.2.3 X-ray mikro počítačová tomografia (μ CT)

X-ray mikroCT je relatívne nová technika v trojdimenzionálnom zobrazovaní materiálov. Táto metóda pozostáva zo získania veľkého množstva obrázkov, kým cez vzorku prechádza žiarenie pod rôznymi uhlami. Tieto obrázky môžu byť kombinované, aby zrekonštruovali približnú geometriu vnútornej štruktúry. Tradičné röntgenové zobrazovanie v medicínskych aplikáciách využívajú absorpčný kontrast medzi kosťami s vysokou hustotou a tkanivami s nízkou hustotou. No v prípade materiálov s minimálnym kontrastom sa využíva tzv. „zobrazovanie fázovým kontrastom“ [7].

V medicínskom röntgenovom zobrazovaní sú posielané X-lúče cez vzorku a nasnímané ako projekcie fóliou alebo elektronickým detektorom. Takýto obraz nám poskytuje iba obmedzenú informáciu o vnútornej štruktúre vzorky, pretože priestorová informácia sa stratila v priebehu projekcie na rovinnú plochu detektora. Cieľom tomografie (počítačovej tomografie - CT) je odhalenie 3D informácie. Preto sa získavajú projekcie vzorky v rôznych smeroch (v našom prípade je vzorka postupne otáčaná v zväzku X-lúčov) a následne sú uložené digitálne. Potom špeciálny počítačový

algoritmus vypočíta 3D obraz skúmaného objektu z týchto samostatných rádiogramov. Rôzne metódy vytvárania obrazov poskytujú možnosť pre analýzu a prezentáciu 3D dát [7].

2.2.3.1 Princíp priemyselných CT

Tomograf je zariadenie na vytváranie tomogramov (dvojdimenziálnych obrazov rezov trojdimenzionálnym objektom) s pomocou množiny meraní zoslabení RTG žiarenia.

Počítačová tomografia spočíva v množine meraní zoslabenia lúča rtg. žiarenia prejdeného skúmaným objektom po množine definovaných dráh nasledované spracovaním získaných dát s použitím matematických rekonštrukčných algoritmov. Výsledkom rekonštrukcie je rozloženie zoslabenie $I(x_n, y_m)$ použitého rtg. žiarenia pre pixely v počítanom reze skúmaným objektom [8].

Priemyselná tomografia je v princípe analogická k lekárskej tomografii ľudského tela. Relatívne vysoké zoslabenie rtg. žiarenia v kovoch však pre radu aplikácií vyžaduje použitie vyšších energií fotónov rtg. žiarenia, špeciálnych kolimátorov a detektorov.

Hlavnými časťami priemyselného rtg. počítačového tomografu sú rtg. zdroj, kolimátory, numericky riadený polohovací elektro-mechanický držiak meraného objektu (s tromi stupňami voľnosti - x, y, φ) detektor a riadiaci počítač. Nevyhnutným doplnkom je softvér pre riadenie tomografu a pre rekonštrukciu tomogramov [8].

Poznámka: Tomograf je zariadenie, tomogram je obraz a tomografia je metóda.

Priemyselné tomografy ponúkané na trhu majú poväčšine podobnú konštrukciu. Medzi zdrojom rtg žiarenia a detektorom, ktorý premieňa žiarenie na elektrický signál (čiže na informáciu), rotuje meraná súčiastka okolo zvislej osi. Počas jej rotácie sa v jednotlivých krokoch snímajú rtg obrazy, tzv. röntgenogramy. Z týchto obrazov (často niekoľko stoviek) vytvorí rekonštrukčný softvér trojrozmerný model reálnej súčiastky vo forme mračna bodov. Tieto body nazývané voxely (odvodené od pojmu priestorový bod - volume pixel) sú v priestore usporiadané body, ktorým je priradená napr. 16-bitová informácia o absorpčnej vlastnosti reálnej súčiastky v tejto pozícii. Vo virtuálnom prostredí sa táto informácia zobrazuje ako určitý stupeň šedej farby. V súčasnej dobe konštrukcie priemyselných tomografov, kedy sa rozlíšenie detektora pohybuje okolo 1024x1024 pixelov, predstavuje dátový súbor s informáciou o

snímanom priestore cca 2GB dát. Pri tomografoch s detektormi s rozlíšením 2048x2048 pixelov je objem dát už takmer 16GB [4].

V technickej praxi existuje veľké množstvo najrozmanitejších súčiastok, ktoré sú tvarovo zložité. Veľmi často ide o funkčné plochy, ktoré majú významný vplyv na funkčnosť celého výrobku. V procese vývoja, výroby a používania zariadení obsahujúcich takéto súčiastky sa určite vyskytne situácia, keď treba odmerať rozmer alebo tvarové charakteristiky plôch na ťažko dostupnom mieste súčiastky. Ako sa uvádza v [9], na tento donedávna neriešiteľný problém už v súčasnosti možno nájsť riešenie. Vývoj metrológie sa dostal do štádia, keď možno zmerať aj rozmery a tvarové charakteristiky na miestach súčiastky, ktorých sa nevieme „dotknúť“ konvenčnými meracími prostriedkami. Riešením týchto problémov môže byť napr. Metrotom. Ide o merací prístroj, ktorý podobne ako počítačový tomograf pri ľudskom tele slúži na presné zobrazenie a meranie pri výrobkoch [9].

Dnešné priemyselné tomografy sú navrhované pre snímanie s vysokou presnosťou. Vďaka tomu sa ich využitie rozšírilo z diagnostickej oblasti až do oblasti metrológie, kde ponúkajú pridanú hodnotu vo forme presných meracích prístrojov na kontrolu tvarovo veľmi komplikovaných súčiastok, ktoré doteraz nebolo možné merať inou technológiou (Obr.4). Ide väčšinou o súčiastky s oblastami nedostupnými pre konvenčnú meraciu techniku. Firma Carl Zeiss ako jeden z výrobcov priemyselných tomografov nazvala túto technológiu Metrotomografia, čo je spojenie termínov metrológia a tomografia [4]. Medzi hlavné oblasti využitia metrotomografie patria:

- testovanie: - kvalita spojov v zostavách
- analýza pórovitosti
- analýza porúch a defektov
- inšpekcia materiálu
- meranie rozmerov vonkajších i vnútorných prvkov
- spätné inžinierstvo (získanie CAD modelu z reálnej súčiastky)
- porovnávanie celkovej geometrie menovitej s reálnou (zosnímanou)

Vďaka týmto vlastnostiam sa využitie priemyselnej tomografie rozšírilo do oblastí strojárstva, automobilového priemyslu, elektroniky, potravinárskeho priemyslu a mnohých iných oblastí [4].



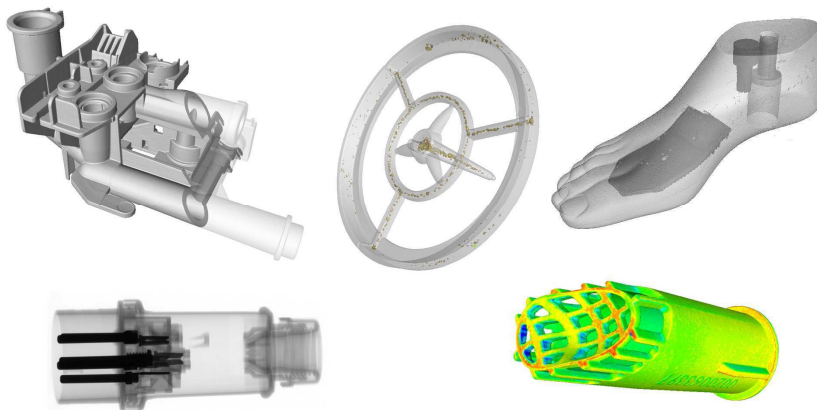
Obr. 4 prvý komerčný počítačový tomograf Siretom firmy Siemens z roku 1974 a Metrotom 1500 (Carl Zeiss) ako reprezentant najnovších počítačových tomografov určených pre priemysel [4]

2.2.3.2 Využitie metrotomografie

Oproti konvenčným metódam merania rozmerov súčiastok prináša tomografia množstvo možností, ktoré doposiaľ pri kontrole kvality chýbali. Značnou výhodou je získanie informácie o neprístupných oblastiach pre konvenčnú 3D súradnicovú meraciu techniku či už dotykovú, kamerovú alebo laserovú. Röntgenovým snímaním dostávame virtuálny model, ktorý môžeme ľubovoľne natáčať, preskúmať v rezoch alebo podrobiť ďalším analýzam. Práve získanie informácie o celom objeme objektu prináša tieto výhody.

Žiadanou a nenahraditeľnou možnosťou metrotomografie je kontrola pórovitosti materiálov, prípadne výskytu cudzích materiálov vo vnútri objektu bez deštrukcie reálnej súčiastky. V [4] sa uvádza, že v dnešnej dobe je možné určiť vysoko presnú hodnotu pórovitosti materiálu, určiť umiestnenie, tvar a veľkosť každej bubliny, ktorá sa pri procese výroby dostala do materiálu. Ďalšou výhodou je kontrola zostavených dielov. V priebehu montáže občas nastáva problém, kedy samostatné diely rozmerovo vyhovujú, avšak zmontovaný celok buď nefunguje, vykonáva nežiaduce funkcie (často je to neprimeraný hluk, vibrácie, deformácie) alebo funguje len krátkodobo. Pri rozobratí zostavy by sa tento stav mohol eliminovať alebo by mohlo dôjsť k poruche, ktorá by poškodila niektoré komponenty. Takéto zostavy dielov môžu byť nasnímané pomocou tomografu. Pri dieloch, vyrobených z materiálov s rozdielnou hustotou ako napríklad kov a plast, je možné určiť, aby plastová časť, ktorej prislúchajú body s určitým stupňom šedej farby nebola zobrazená. Takýmto transparentnením časti modelu (väčšinou povrchových krytov) je možné prezrieť zostavu bez tejto prekážky.

Populárnym softvérom pre prácu s mračnom bodov u viacerých výrobcov počítačových tomografov je program VG Studio Max (obr. 5).



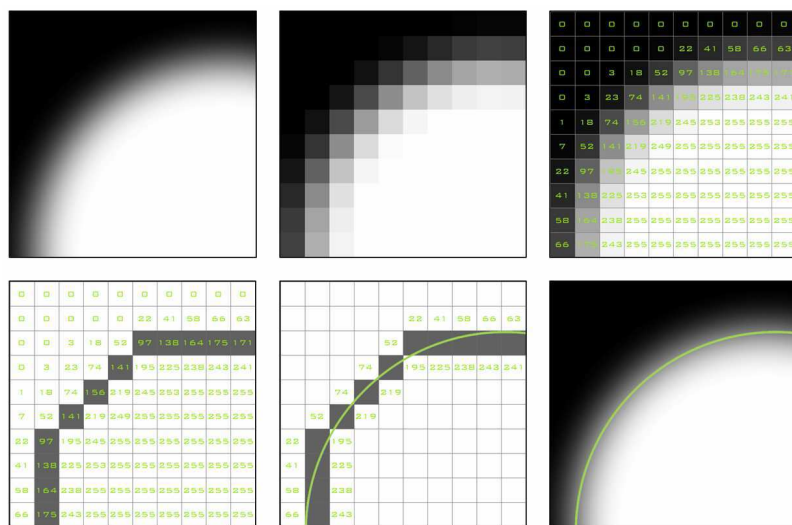
Obr. 5 Možnosti metrotomografie: diagnóza z röntgenogramov, virtuálna separácia materiálov, nedeštrukčné prerezávanie objektom, analýza pórovitosti, tvarová analýza pri porovnaní s CAD dátami [4]

2.2.3.3 Rozmerová analýza

Každý z výrobcov priemyselných tomografov na trhu (napr. Carl Zeiss, Bruker, Werth, Wenzel, Phoenix, NorthStarImaging, atď.) uprednostňuje iný softvér pre vyhodnocovanie rozmerov. V závislosti od veľkosti meranej súčiastky, priepustnosti rtg žiarenia snímaným materiálom a účelu dát sa pred samotným snímaním nastavujú jeho parametre. Výkon žiariča sa napr. v prípade Metrotomu 1500 nastavuje voľbou hodnoty napätia až do hodnoty 225 kV a prúdu v rozmedzí 0 až 1 mA. Maximálny výkon žiariča je teda 225 W [4]. Ďalšími parametrami, ktoré ovplyvnia snímaný obraz sú citlivosť detektora a expozičná doba, počas ktorej sa jednotlivé snímky zaznamenávajú. Všetky tieto parametre musia byť nastavené tak, aby bol obraz správne exponovaný a nestrácali sa detaily obrazu prílišným alebo nedostatočným prežiarením. Súčiastku je nutné polohovať tak, aby počas rotácie okolo zvislej osi bol jej obraz stále v zornom poli detektora a to tak, aby zaberol čo najväčšiu plochu. Pred spustením merania sa nastavuje aj počet polôh na otáčku, tj. počet obrazov, ktoré sa uložia pre rekonštrukciu.

Týmito nastaveniami sa priamo ovplyvňuje veľkosť voxelu, čiže rozlíšenia, ktoré bude mať výsledné mračno bodov. Čím je bližšie súčiastka pri zdroji žiarenia (teda ďalej od detektora), tým väčší obraz súčiastky sa premietne na detektore a tým aj menší reálny rozmer má jeden voxel. Pri malých súčiastkach je možné získať rozlíšenie aj pod 10

mm. V prostredí Calypsa je mračno bodov po importe ďalej spracované pre získanie vyššieho rozlíšenia a tým aj presnosti merania. Proces zvyšovania rozlíšenia v tomografii sa nazýva subvoxelizácia [4]. Ide o rovnaký princíp, ktorý sa využíva pri kamerových senzoroch na zvýšenie rozlíšenia plošných obrazcov nazvaný subpixelizácia. Subpixelizácia (obr. 6) umožňuje rozdeliť pixel, ktorý nesie väčšinou 8 alebo 16 bitovú informáciu reprezentovanú stupňom šedej farby, na menšie diely v závislosti na hodnote, ktorú nesie a tiež na hodnotách susedných pixelov. Rastrovaný obraz bez tzv. „image processingu“ dokáže len veľmi hrubo identifikovať hrany nastavením hodnoty prechodovej hranice (tzv. threshold). Subpixelizáciou sa vypočíta poloha hrany objektu v rámci jednotlivých pixelov a vhodnou metódou tvorby stredného prvku, napr. gaussovou metódou sa interpoluje tvar hrany. Obdobne sa vyhodnocuje aj poloha hrany alebo plochy objektu v priestore využitím subvoxelizácie. Pri určitých podmienkach je možné delením voxelov na menšie časti získať až 10 násobne jemnejšie rozlíšenie.



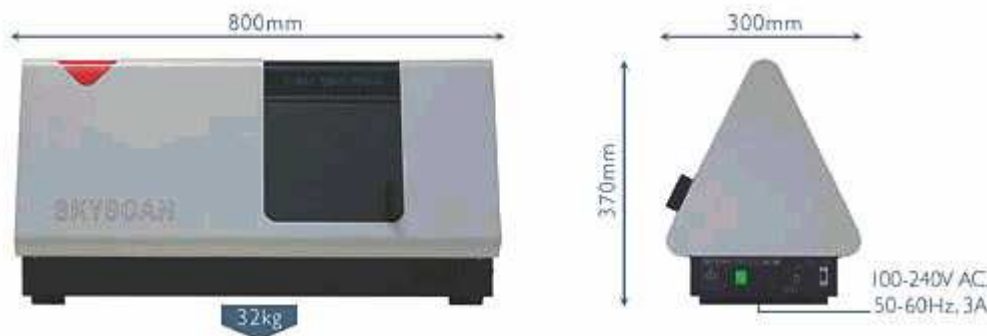
Obr. 6 Princíp subpixelizácie [4]

Nakoľko je počítačová tomografia novou technológiou v oblasti metrológie, neexistujú zatiaľ ucelené objektívne normy (štandardy) pre stanovenie neistoty merania.

Digitalizáciou meraného objektu tomografiou získavame „každý“ bod povrchu aj vnútra súčiastky. Ak sa po vyhodnotení zadaných rozmerov zákazník rozhodne, že potrebuje na súčiastke stanoviť hodnoty ďalších charakteristík, nie je potrebné skenovať súčiastku znova, len sa stanoví stratégia merania na novom elemente a tým sa vyhodnotia body z mračna bodov, ktoré tomuto elementu prislúchajú [4].

2.3 Skyscan 1174

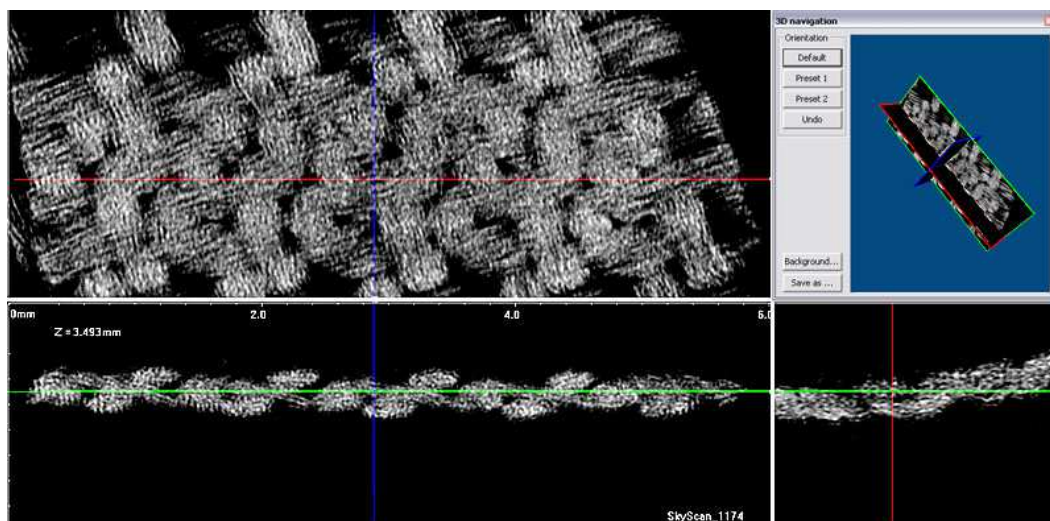
Skyscan 1174 patrí medzi svetovo najkompaktnejšie X-ray micro-CT (obr.7) a je dostupný za zlomok ceny v porovnaní s konkurenčnými systémami [10]. Pri malých rozmeroch tento systém ponúka rýchle 3D zobrazovanie s vysokým rozlíšením.



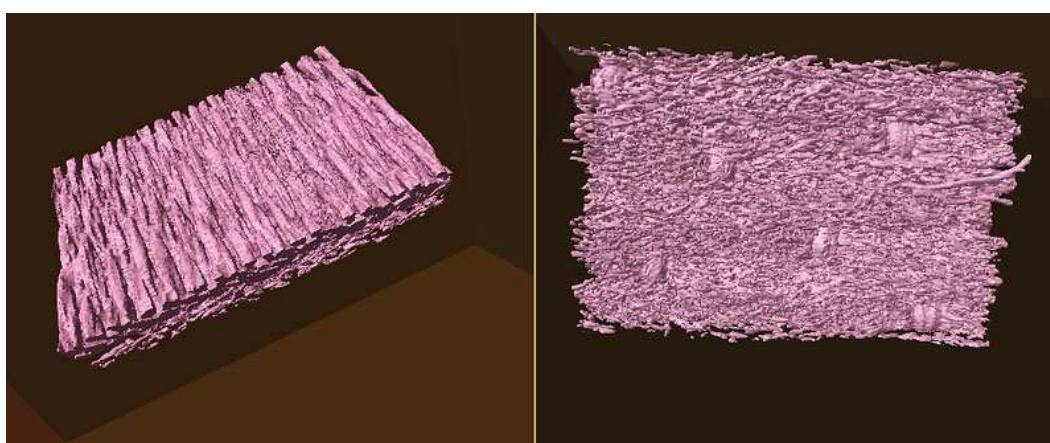
Obr. 7 SkyScan 1174 X-ray micro-CT

- maximálny výkon 50 Kv a 800 mA - bezúdržbový zdroj X-lúčov ,
- Chladená 1,3 megapixlová x-ray kamera,
- 3D priestorové rozlíšenie až do 6 μ m,
- Skenovanie počas komprimovania, napätia a chladenia,
- 2D/3D analýza obrazu a realistické vizualizácie.

Tento skener používa x-ray zdroj s nastaviteľným napätím a rad filtrov pre všestranné prispôsobenie rôznym hustotám objektov. Citlivá 1,3 megapixlová x-ray kamera umožňuje snímání celého objemu vzorky v priebehu niekoľkých minút. Variabilné zväčšenie (6-30 μ m veľkosť pixelu) je kombinované s polohovaním objektu pre jednoduchý výber časti objektu, ktorá má byť snímaná. Skener je možné spustiť z ľubovoľného stolového počítača alebo notebooku, vyžaduje len jeden USB (alebo sériový) port a FireWire (IEEE1394) vstup [10]. Existuje niekoľko programov, ktoré spolupracujú so zariadením Skyscan, ako napríklad SkyScan "Data Viewer" (obr.8), NRecon – rekonštrukcia rezov z tomografie, CTan - software pre 2D / 3D kvantitatívnu analýzu a CTvox pre realistickú 3D vizualizáciu (Obr. 9).



Obr. 8 ilustračný obr. z programu Data Viewer : syntetická tkanina scanovaná prístrojom SkyScan 1174 - 3 orthogonálne virtuálne rezy , veľkosť voxelov 6 μm [11]



Obr. 9 3D vizualizácia mikroštruktúry vzorky vytvorená programami CTan+CTvol [11]

2.3.1 Parametre snímania:

Pred samotným spustením scanovania je nutné nastaviť niekoľko parametrov, na základe ktorých bude proces prebiehať a od ktorých bude závisieť kvalita výsledného obrazu.

A - Pixel size - veľkosť pixelu obrázku môže byť buď v rozpätí 6- 33 μm alebo 12- 66 μm .

Malá veľkosť pixelov zabezpečuje ostrejší obraz, ale zároveň zdvojnásobuje čas skenu pre ekvivalentne veľké pixely.

B - Rotation step - rotačný krok: rozhoduje o rotačnom uhle, pod ktorým sa otáča vzorka resp. interval v akom bude kamera snímať obraz. Môže sa pohybovať od 0,5 stupňa a vyššie. V našom prípade sme zvolili rotačný krok 0,7 °. Čím menší rotačný krok zvolíme, tým bude dodané väčšie množstvo obrázkov z čoho vyplýva aj dlhší priebeh merania.

C - Rotation degrees - stupne otáčania : Vzorky je možné skenovať pri 180° alebo pri 360 °. Skeny pri 360° zdvojnásobia počet snímok a priebeh merania.

D – Averaging - priemerovanie : Zadáva sa počet snímok z ktorých je vytvorený jeden samostatný obrázok. Zvýšením počtu snímok zostríme obraz a zvýrazníme vonkajšie detaily vzorky, taktiež však zvyšujeme dĺžku trvania merania.

E – Expozícia – Množstvo svetla premietaného na vzorku. Čím vyššia hodnota expozície tým čistejší bude výsledný obraz, avšak existujú isté limity, ktoré keby sme prekročili dôjde k preexponovaniu resp. znehodnoteniu merania.

Proces skenovania:

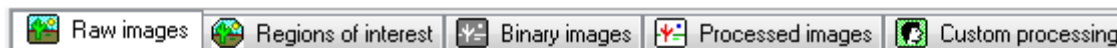
Surové obrazy vo formáte TIFF sú zrekonštruované pomocou softwaru NRecon na vybudovanie 3-D rekonštrukcie vzorky. Zrekonštruované obrazy sa dodávajú vo formáte BMP, ktorý sa následne využíva pri analýze v programe CTAn.

Na tvorbu 3-D obrazov pre prezentácie a publikačné účely sú dostupné ďalšie dva software - **CTVol and CTVox**. [12]

2.3.2 Analyzačný program CTAn

Po preštudovaní manuálov k prístroju Skyscan sledujeme, že táto pomerne nová technika poskytuje rôzne kľúčové výhody oproti iným technikám. Tým, že ide o výpočtovú metódu je možné vypočítat' mnohé parametre v závislosti od možností daného softwaru a hardwaru. Program CTAn je vlastne analyzačný program na zobrazovanie získaných dát, ich analýzu a vytvorenie 3D modelu. Práca v analyzačnom programe CTAn by sa dala rozdeliť na tzv. 5 hlavných operácií (Obr.10), ktoré ďalej obsahujú veľké množstvo rôznych funkcií [13].

1. práca s prvotným „surovým“ obrazom (The raw image page)
2. práca s oblasťou záujmu (The Region of interest page)
3. práca s binárnym obrazom (The Binary image page)
4. práca so spracovaným obrazom (výpočty) – (The processed image (calculation) page)
5. vlastné spracovanie (The custom processing page)



Obr. 10 ikony pre 5 hlavných operácií v programe CTan

Kvôli rozsahu tejto práce nie je možné popísať všetky dostupné funkcie (všetky funkcie je možné naštudovať v CTan User Manual [13]), avšak predstavíme si základnú morfometrickú individuálnu 2D a 3D analýzu skúmanej vzorky a taktiež 3D analýzu celého objektu, alebo jeho vybranej časti (ROI). Niektoré vybrané funkcie je možné nájsť ďalej v experimentálnej časti práce.

2.3.2.1 Štrukturálne parametre merané pomocou Skyscan™ CT-analyzer software

Morfometrické výpočty spadajú do vyššie spomenutého bodu 4. (práca so spracovaným obrazom) kde je možné spracovať 2D a 3D analýzu objektu. Táto je však prístupná až po vytvorení binárnych obrazov (bod 3.). Časti nasnímaného obrazu, ktoré sú **biele** v binárnom zobrazení sú identifikované ako **hmota**, a všetky ostatné **čierne** sa považujú za **okolité pozadie**.

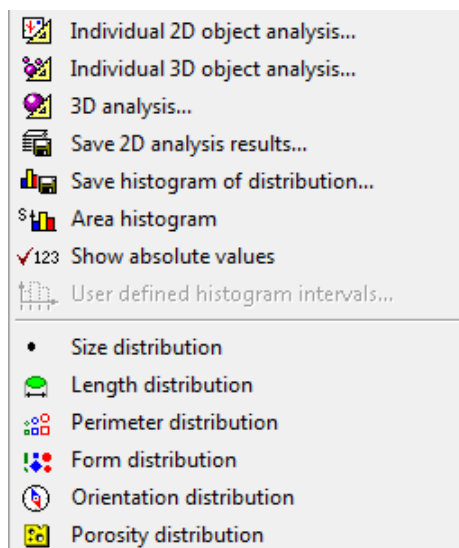
Morfometrické parametre sú vypočítané pomocou CT- analyzátora buď priamo z 3D modelu, alebo z 2D individuálnych binarizovaných obrazov prierezu. Pre oboje 3D aj 2D merania existujú 2 typy analýzy. Poprvé, všetky objekty vo vybranej oblasti môžu byť analyzované spoločne, a spočítané dokopy, ako napr. celkový objem alebo povrch všetkých objektov, alebo priemerná hrúbka všetkých objektov. Podruhé, individuálne „diskrétné“ objekty môžu byť posudzované, na základe toho, že sú úplne obklopené prázdny priestorom, či už v 2D (pri samostatnom jednom obraze prierezu), alebo v 3D (pre vybraný objem zahrňujúci veľa levelov prierezu). Morfometrické parametre môžu

byť teda realizované na všetkých týchto individuálnych objektoch. Tým pádom môžu byť vykonané 4 kategórie analýzy, zahrňujúce jak integrovanú analýzu všetkých vybraných objektov (s jedným jediným výsledkom pre všetky objekty dokopy), tak aj individuálnu analýzu všetkých „diskrétnych“ objektov (s osobitným výsledkom pre každý objekt); a obidve analýzy môžu byť prevedené jak v 2D, tak aj v 3D. V prílohe A sú uvedené všetky 2D a 3D skúmané parametre pomocou morfometrickej analýzy. Všetky výpočty sú vykonané vo vybranej časti. Dôsledný a presný výber oblastí alebo objemov záujmu je veľmi dôležitý pre získanie presných a zmysluplných dát. V tejto chvíli je vhodné objasniť použitú terminológiu.

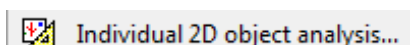
Termín „oblasť záujmu“ (region of interest = ROI) označuje vybraný úsek jedného samostatného obrazu rezu. 2D analýza je vykonávaná vo vnútri ROI. Termín „objem záujmu“ (volume of interest = VOI) označuje v podstate súčet všetkých ROI v súvislej skupine priečnych rezov, ktoré reprezentujú vybraný 3D objem. V Skyscan CT analyzátore je možné zvoliť 4 alternatívy jednotiek, a to mm, μ m, inch alebo pixel. Všetky merania morfometrických parametrov v 3D a 2D sú vykonávané na segmentovaných, alebo binarizovaných obrazoch. Segmentácia resp. „thresholding“ musí byť spravená skôr ako zahájime analýzu [13].

Práve thresholding predstavuje rozhodujúci krok, ktorý ako bolo už spomenuté je nutné vykonať ešte pred 3D modelovaním a ovplyvňuje aj následnú analýzu. Bežne je volený rozsah thresholdingu histograficky alebo podľa vizuálneho odhadu, avšak problém prichádza pokiaľ sa skúmaný objekt skladá z viacerých materiálov. Ďalší z možných problémov predstavuje tzv. beam hardening. Pretože v mikro CT sú použité polychromatické X lúče, menej energetické lúče by boli ľahko zoslabené skúmaným objektom a to by spôsobovalo vysokú expozíciu vo vnútri objektu. Tento efekt sa nazýva beam hardening a výsledkom toho je fakt, že thresholding nie je závislý len od rádointenzity, ale aj od veľkosti vzorky. Avšak mikro CT je pomerne nová technológia a predpokladá sa, že zlepšením algoritmov a nastavení budú v budúcnosti tieto zobrazovacie chyby odstránené [14].

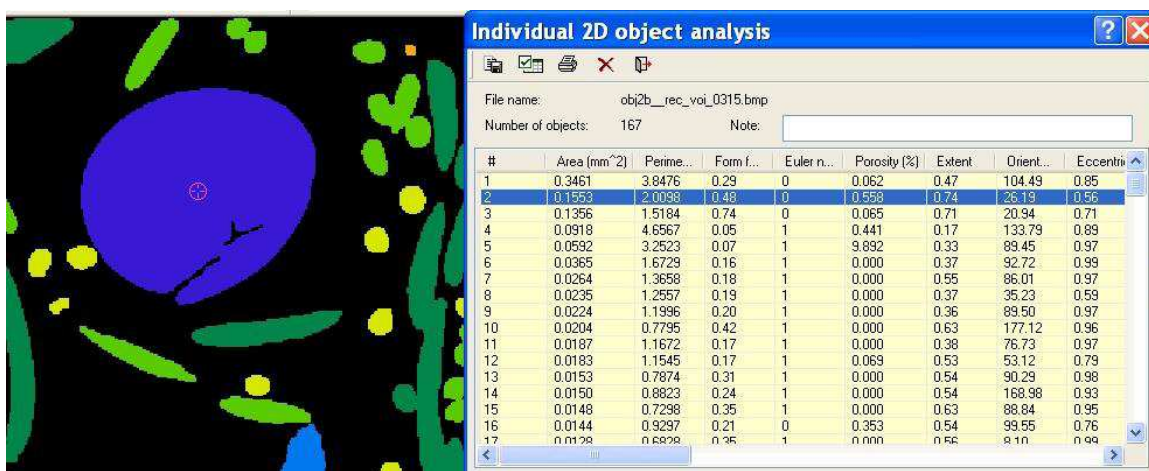
Na obrázku 11 môžeme vidieť príkazy programu CTan [13].



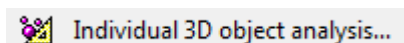
Obr. 11 príkazy analyzačného menu



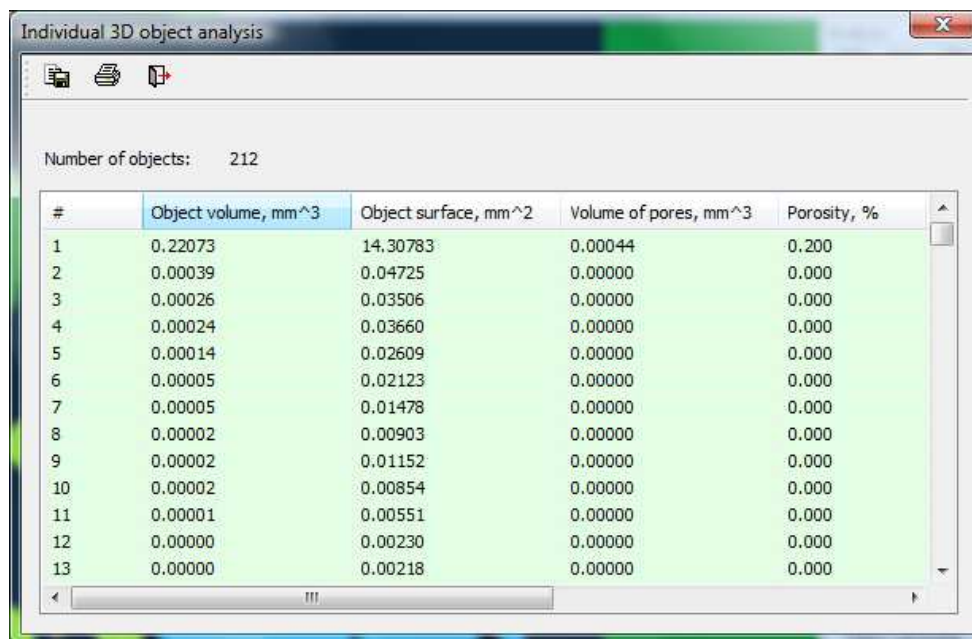
Individuálna 2D analýza objektov meria a vyhodnocuje 2D morfometrické parametre všetkých diskretných binárnych objektov na aktuálnom obraze prierezu. Môže byť označený akýkoľvek objekt vo vybranom reze a pre tento je zobrazená analýza [13].



Obr. 12 ukážka výstupu individuálnej 2D analýzy



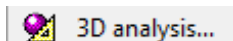
Individuálna 3D analýza objektov meria a vyhodnocuje 3D morfometrické parametre zvlášť pre všetky diskretné binárne objekty v tzv. „objeme záujmu“ (VOI- volume of interest) pre aktuálne dáta. Dátová správa zahŕňa parametre pre každý diskretný 3D objekt [13].



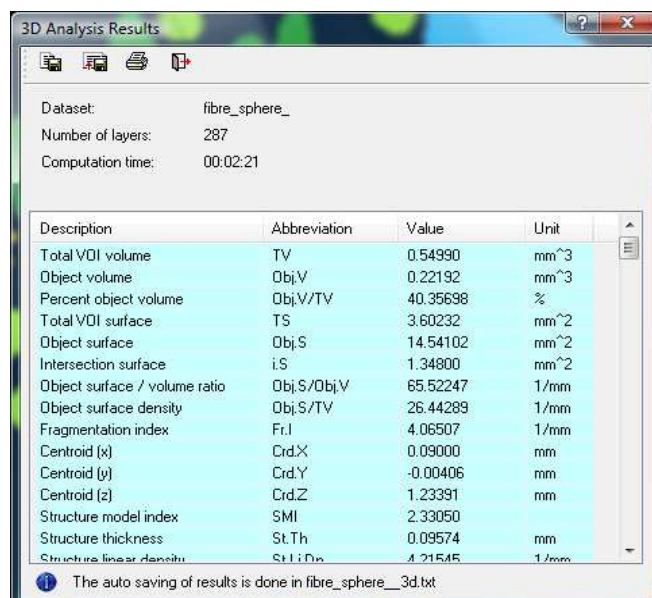
Number of objects: 212

#	Object volume, mm ³	Object surface, mm ²	Volume of pores, mm ³	Porosity, %
1	0.22073	14.30783	0.00044	0.200
2	0.00039	0.04725	0.00000	0.000
3	0.00026	0.03506	0.00000	0.000
4	0.00024	0.03660	0.00000	0.000
5	0.00014	0.02609	0.00000	0.000
6	0.00005	0.02123	0.00000	0.000
7	0.00005	0.01478	0.00000	0.000
8	0.00002	0.00903	0.00000	0.000
9	0.00002	0.01152	0.00000	0.000
10	0.00002	0.00854	0.00000	0.000
11	0.00001	0.00551	0.00000	0.000
12	0.00000	0.00230	0.00000	0.000
13	0.00000	0.00218	0.00000	0.000

Obr. 13 ukážka výstupu individuálnej 3D analýzy



3D analýza meria a vyhodnocuje 3D morfometrické parametre všetkých binarizovaných objektov vo vnútri „objemu záujmu“. Dátová správa uvádza jednotlivo sčítanú, alebo komplexnú hodnotu pre každý parameter, všetkých binarizovaných súčastí objemu záujmu [13].



Dataset: fibre_sphere_
Number of layers: 287
Computation time: 00:02:21

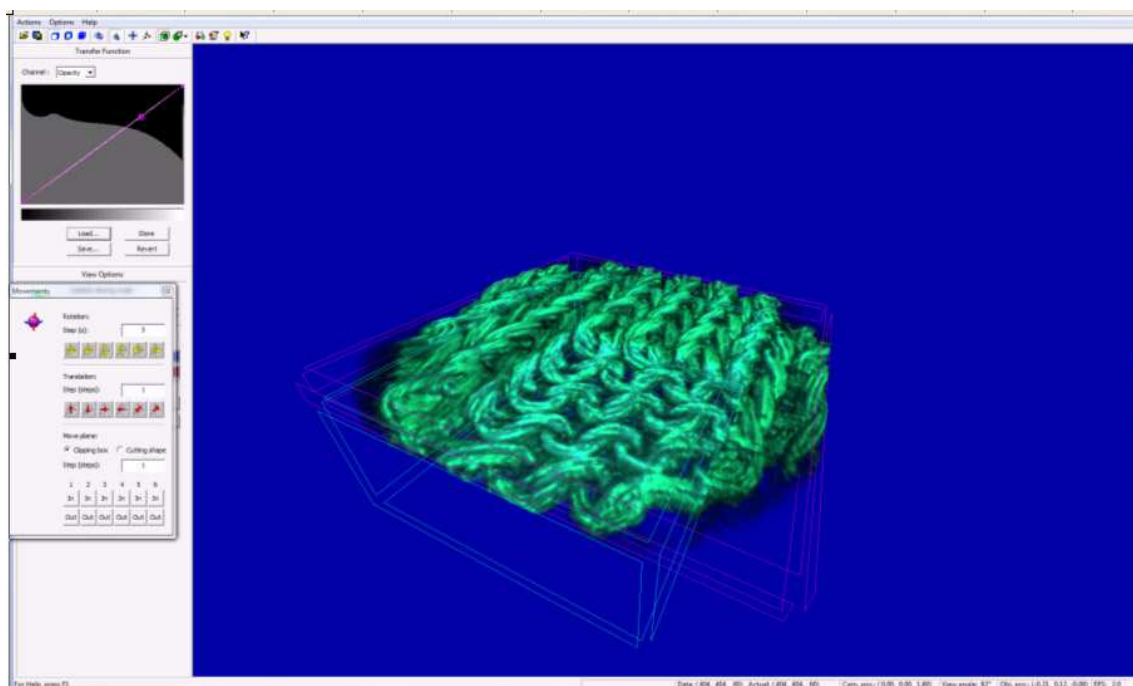
Description	Abbreviation	Value	Unit
Total VOl volume	TV	0.54990	mm ³
Object volume	Obj.V	0.22192	mm ³
Percent object volume	Obj.V/TV	40.35698	%
Total VOl surface	TS	3.60232	mm ²
Object surface	Obj.S	14.54102	mm ²
Intersection surface	i.S	1.34800	mm ²
Object surface / volume ratio	Obj.S/Obj.V	65.52247	1/mm
Object surface density	Obj.S/TV	26.44289	1/mm
Fragmentation index	Fr.I	4.06507	1/mm
Centroid (x)	Crd.X	0.09000	mm
Centroid (y)	Crd.Y	-0.00406	mm
Centroid (z)	Crd.Z	1.23391	mm
Structure model index	SMI	2.33050	
Structure thickness	St.Th	0.09574	mm
Structure linear density	St.Li.Dn	4.21545	1/mm

The auto saving of results is done in fibre_sphere__3d.txt

Obr. 14 ukážka výstupu 3D analýzy

2.3.3 Program CTvox - realistická 3D vizualizácia

Program na zobrazovanie objemu „CTvox“ zobrazuje súbor zrekonštruovaných rezov ako realistický 3D objekt s intuitívnou navigáciou a manipuláciou jak objektu, tak aj kamery, flexibilný nástroj „clipping tool“ na vytvorenie zrezaných pohľadov na objekt. Zaujímavou funkciou je vytváranie videí „flight recorder“, ktorá umožňuje rýchle vytváranie tzv. „fly around“ a „fly through“ animácií, založených na výbere niekoľkých kľúčových obrazov s automatickou interpoláciou medzi týmito obrazmi. Možnosti zobrazenia obrazu zahŕňajú vizuálne funkcie úpravy obrazu ako napr. rôzne úrovne osvetlenia, tieňov, farieb, priehľadnosť, stereo zobrazovanie atď. [15]. Názorné ukážky práce v CTvox sú uvedené taktiež v prílohe E.



Obr. 15 pracovné prostredie programu CTvox – 3D model pleteniny skúmanej v tejto práci

2.4 Využitie mikrotomografických CT zariadení v oblasti textilnej metrológie

2.4.1 Distribúcia a transport vlhkosti v textilných vrstvách

Distribúcia a transport vlhkosti v textíliách a v textilných vrstvách zohráva dôležitú úlohu v komforte odievania, špeciálne v prípade športových odevov, pracovných, alebo ochranných odevov [16].

X-ray tomografia je atraktívna metóda pre štúdium týchto vlastností, pretože poskytuje množstvo možností pre analýzu a vizualizáciu „surových“ dát: radiálne a vertikálne rezy, 3-D prezentácie, kvantitatívne vyhodnotenie, používateľom zvolený threshold alebo rozlišovanie pomocou farieb a taktiež porovnanie rôznych stavov materiálov (napr. za mokra a za sucha). V práci [17] bolo predstavené štúdium transportu vody v textíliách, bez potreby kontrastnej látky, pri rozlíšení menej ako 100 μm .

V tomto výskume boli prezentované výsledky získané stolovým X-ray tomografom pre štúdium transportu vody v ponožkách a laminátov v topánkach.

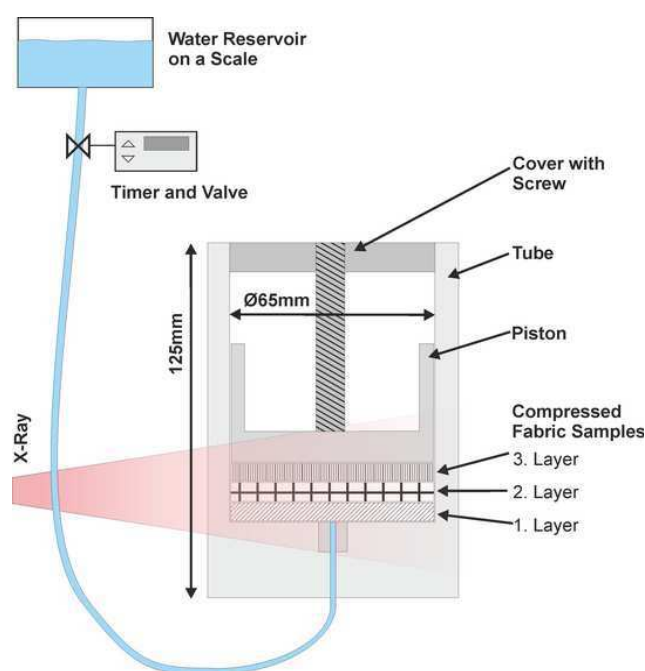
Štúdium prestupu tepla a vlhkosti cez textílie je veľmi dôležitou témou pri vývoji a zlepšovaní oblečenia. Štúdium konkrétnych materiálov predstavuje klasický spôsob hodnotenia rozdielov medzi odevnými systémami zloženými z rôznych textílií a s rôznymi konštrukciami, ale sú relatívne nákladné kvôli individuálnym rozdielom mnohých dôležitých faktorov podstatných pri hodnotení vnímania fyziologického komfortu. Podľa [18] sa v priebehu niekoľkých rokov vyvíjali metódy k hodnoteniu konkrétnych aspektov prestupu tepla a vlhkosti, ako napr. skin model alebo manekýni, schopné prispôbiť sa informácii o prestupe tepla na základe transportu vodných pár, alebo odparovaniu tekutej vlhkosti z povrchu manekýna. Štúdie tohto typu sú podstatné pri chápaní konštantných alebo aj dynamických procesov spojených s nosením odevu. Prestup tepla a jeho kumulácia v odevnom systéme môže byť ovplyvnená špecifickými vlastnosťami vyparovania tekutej vlhkosti.

V článku [17] sa dozvedáme, že kvantitatívne rozmiestnenie vlhkosti v textíliách bolo dlho hodnotené gravimetricky na škále kompletného systému no v súčasnosti vzrastá použitie nových metód pri hodnotení menších dĺžkových škál, a to napr. zobrazovanie magnetickou rezonanciou, neutrónovou rádiografiou, X-ray rádiografiou alebo X-ray tomografiou. Zároveň sa vyvíjajú výpočtové modely na skúmanie

transportu vlhkosti, ktoré vyžadujú zhodnosť s predpokladanou distribúciou. X-ray tomografia najmä μ CT s rozlíšením 10-100 μ m predstavujú vhodnú metódu na štúdium textílií. Prístroj je dostatočne malý na to, aby sa dal umiestniť aj na stôl a je pomerne štandardizovaný. Doteraz bol využívaný napr. na zisťovanie obsahu vody v rôznych vrstvách viacvrstvového odevného systému, za použitia priloženého vyhrievaného skin modelu so simulovanou perspiráciou.

V [17] bol každý odevný systém najprv zobrazený v pôvodnom stave, a potom zobrazovaný ako funkcia v čase počas simulovanej perspirácie. Následne bol na základe výpočtu tomogramov určený podiel vlhkosti. Výsledky ukázali výbornú koreláciu medzi μ CT hodnotami a hodnotami zistenými gravimetrickou metódou.

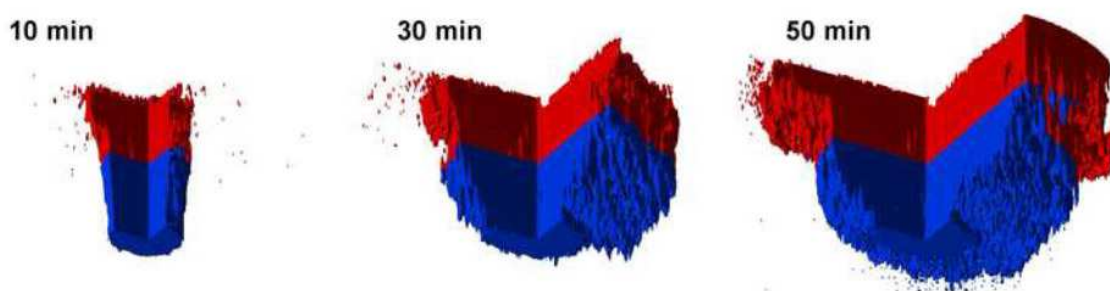
Výskum ukazuje, že pomocou μ CT je možné získať vysoko kvalitné dáta za použitia deionizovanej vody, bez použitia kontrastnej látky (kontrastná látka skresľovala výsledky). Podomácky vyrobený držiak vzorky umožňuje použitie definovaného tlaku na vzorke v priebehu tomografie vid'. Obr.10. Kompletná 3D analýza dát môže byť premietnutá v horizontálnej a vertikálnej rovine alebo rezoch, aby bola odhalená konkrétna poloha transportu vody.



Obr. 16 Držiak vzorky pre X-ray tomografiu textílií s tryskou na simuláciu potenia. Je možné dodať aj určitý tlak za pomoci piestu a skrutky [17]

Môžeme vidieť, že X-ray tomografia je vhodná na štúdium distribúcie vody v textíliách. CT predstavuje výborný doplnok ku skin modelom a poskytuje priamy

náhľad do prebiehajúceho procesu napr. pri športových odevoch počas fyzickej aktivity vid'. Obr.11. Na vizualizáciu X-ray dát je dostupných niekoľko rôznych techník a predstavujú výhodu pri špeciálnych otázkach horizontálneho a vertikálneho transportu vody pri zložitých a viacvrstvových odevných systémoch. X-ray tomografia je taktiež vhodná na štúdium a identifikáciu optimálnej kombinácie zloženia textilných vlákien alebo napr. pletacích technológií na výrobu ponožiek, ktoré sú strihovo prispôsobené rôznemu rozloženiu tlaku na nohách [17].



Obr. 17 3D distribúcia vody v priebehu času. Textilná ponožka je zobrazená modrou farbou, laminát topánky červenou farbou. Pre ilustráciu bola vybraná ľubovoľná oblasť s nasýtením vody v pevnom objeme v hodnote 0,5. Oblasť s nižším nasýtením nie sú viditeľné. [17]

2.4.2 Zostavenie objemového modelu vzhľadu textílie

Vzhľad materiálov ako sú textílie je určený prevažne ich 3D štruktúrou. Skôr ako nahliadneme do tejto problematiky, chceme by som objasniť pojem **rendering**.

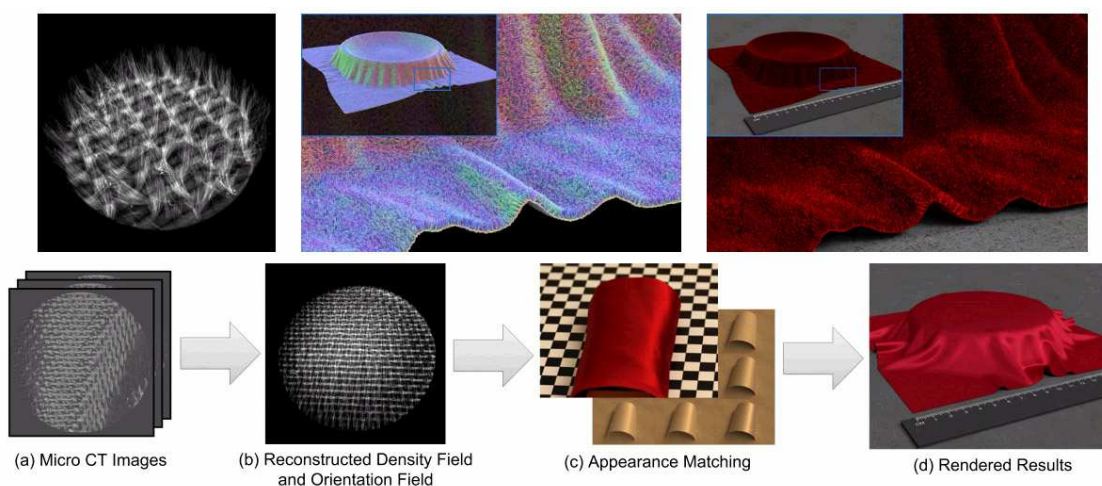
Rendering je tvorba reálneho obrazu na základe počítačového modelu, najčastejšie 3D. Rendering obsahuje v závislosti na softvéri veľa parametrov a nastavení, ktorými možno ovplyvniť konečný vzhľad scény. Pod pojmom rendering rozumieme súhrn metód, ktoré slúžia na vytvorenie fotorealistického obrazu priestorového (3D) objektu na grafickom výstupnom zariadení (obrazovka, tlačiareň). Techniky renderingu simulujú farby, povrchy a svetelné efekty pre obraz ideálneho, virtuálneho modelu. Dve základné operácie v renderovaní sú doprava (transport) (ako moc svetla sa dostane z jedného miesta na iné) a rozptyl (scattering) (aký povrch ovplyvňuje svetlá) [19].

Objemové renderovanie bolo skúmané niekoľko desaťročí ako metóda na renderovanie takých materiálov, pre ktoré sú klasické modely povrchov nevyhovujúce [20].

Výskum [21] predstavuje nový prístup k zobrazovaniu objemových modelov, založených na hustotných dátach získaných z X-ray CT skenov a na dátach vzhľadu získaných z fotografií pri neregulovanom osvetlení.

Napríklad μ CT sken tkanej textílie poskytuje detailný pohľad na pretkané priadze a ich vlákna, s presne zaznamenanou orientáciou vlákien a pozíciou priadzí, ale neposkytujú žiadnu informáciu ako na seba vzájomne pôsobia so svetlom (nedá sa nijako povedať, či je textília čierna, alebo biela ... resp. inej farby). Aby sa stali CT dáta realistickým modelom vzhľadu je potrebná pomerne malá doplnková informácia. Pokiaľ sa spoja so správnou renderovacou technológiou, jednoduchý lokálny model odrazu od vlákien automaticky predpovedá charakteristický vzhľad veľmi odlišných materiálov ako napr. zamat a satén, jednoducho z toho, že bude známa ich 3D štruktúra materiálu.

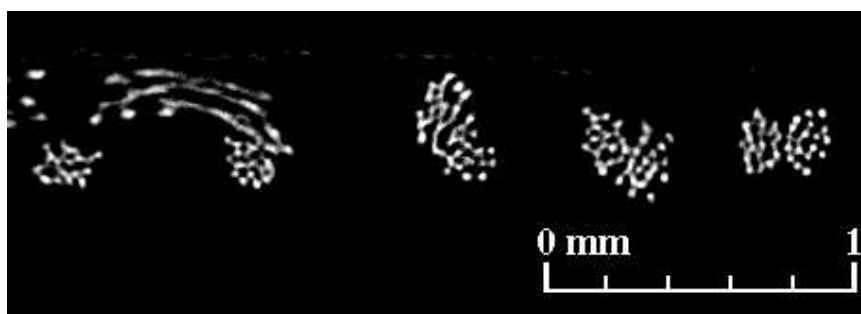
Vybudovanie objemového modelu vzhľadu zložitých materiálov ako napr. zamatu za použitia CT zobrazovania môžeme vidieť na obr. 18: (vľavo) CT dáta poskytujú skalárnu hustotu na malom objeme; (stred) získame orientáciu vlákien (ukážka v nepravých farbách) a pokryjeme ňou väčšie povrchy; (v pravo) priradíme parametre vzhľadu k fotografiám, aby sa vytvoril kompletný model vzhľadu. Tým sú napodobené jak jemné detaily tak aj charakteristické „melíry“ zamatu [21].



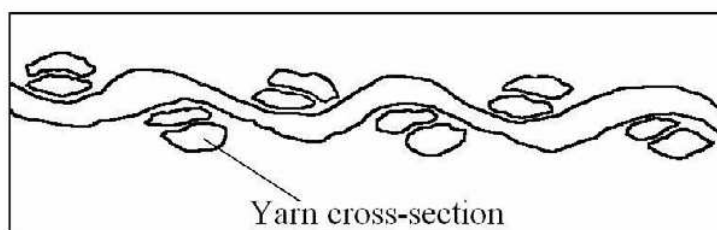
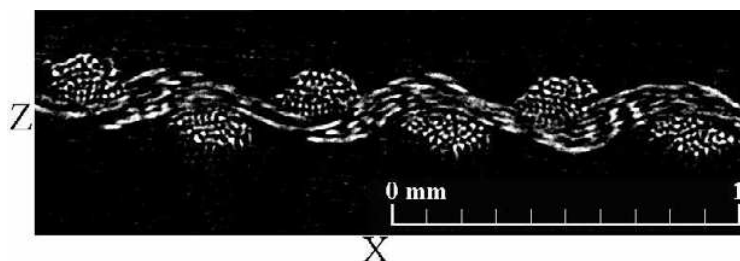
Obr. 18 proces tvorby objemového modelu vzhľadu textílie [21]

2.4.3 Analýza štruktúry pletenín a tkanín

Štruktúra textílií sa v textilnom priemysle sústavne skúma. Výsledky týchto výskumov významne prispeli k štúdiu designu textílií. Analýza štruktúry textílií sa stále vykonáva konvenčnou metódou, kedy sa na skúmanie textílií používa mikroskop a textília sa musí kvôli získaniu vzoriek rozstrihať. Tento proces sa však v súčasnosti stáva veľmi časovo náročným, pretože nedávny vývoj v textilnej technológii prispieva k tomu, že súčasné textilné štruktúry sú veľmi zložité. Preto sú v týchto dňoch na získanie presných a rýchlych výsledkov potrebné automatizované a pomocné metódy na analýzu štruktúry textílií. Za pomoci X-ray CT scanneru sa nedeštruktívnym spôsobom získavajú obrazy priečných rezov textilných vzoriek vid'. Obr.19, 20. CT ponúka veľa výhod, ako napr. nedeštruktívnu analýzu, automatickú prevádzku a získavanie obrazov s vysokým rozlíšením. Okrem toho môžu byť CT obrazy použité ako 3D obrazy na uskutočnenie 3D analýzy štruktúry textilnej vzorky.

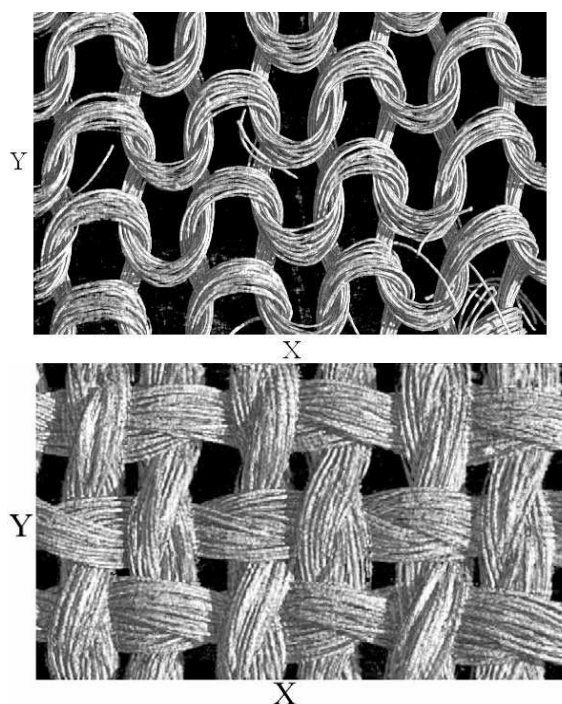


Obr. 19 CT snímka priečného rezu jednolícnej pleteniny [22]

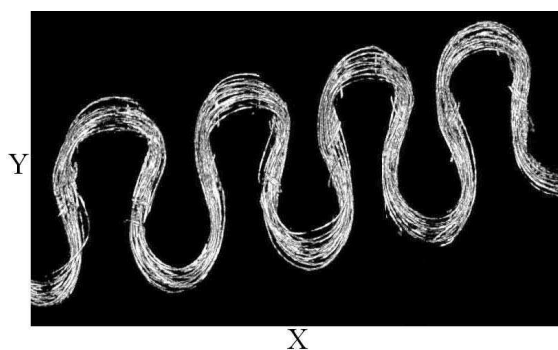


Obr. 20 CT snímka priečného rezu tkaniny s plátňovou väzbou [23]

Vo vedeckej práci [22] bola analyzovaná štruktúra dvojvrstvovej tkanej textílie za pomoci 3D CT obrazu. Pri tejto vzorke by nebolo možné analyzovať štruktúru za použitia povrchového obrazu. V štúdií [22] a [23] bola jednotlivá priadza vyjadrená technikou objemového renderovania (volume-rendering) s náhodne rozmiestnenými voxelmi z 3D CT obrazu za použitia získaných informácií pozície priadze vid'. Obr.21. a 22. Vyjadrenie jednotlivých priadzí nám pomáha pochopiť ako je priadza deformovaná v reálnej textílii, pretože môžeme sledovať jednotlivé deformované priadze v ich prierezoch, čo by inak nebolo možné. Toto pozorovanie je využiteľné pri navrhovaní a kontrole nových a existujúcich textílií.



Obr. 21 vzorka jednolícnej pleteniny a tkaniny s plátňovou väzbou zobrazená technikou objemového renderovania za použitia jej originálnych CT snímok [23]



Obr. 22 Samostatná priadza zobrazená technikou objemového renderovania [22]

2.4.4 Charakteristika variability v 3D textilnej architektúre

Príspevok [24] sa zaoberá variabilitou vystužených polymérnych kompozitov, ktorá je veľmi podstatná najmä ak je výstužou textilný produkt. Keďže zdroje variability nie sú celkom dobre preskúmané, metódy sa nedajú dobre kontrolovať alebo správne predikovať účinky variability na kvalitu a spoľahlivosť kompozitných štruktúr. Avšak to je pomerne dôležité pri bezpečnostných komponentoch v leteectve a pri odhadovaní životnosti rôznych aplikácií. Nedeštruktívna μ CT technika sa v súčasnosti používa v kompozitných materiáloch na charakterizovanie geometrie, pri tvorbe modelov, alebo na analyzovanie začínajúceho poškodenia v materiáloch.

Podľa [25] sú vlastnosti kompozitov dané štruktúrou ich textilných výstuží, ktorá podlieha zmenám vo výrobnom procese. Na predikciu mechanických vlastností textilných kompozitov je potrebná vhodná definícia mikroštruktúry. Zmeny v spôsobe spriadania vlákien sú najväčším dôvodom, prečo rovnaké materiály spracované iným spôsobom môžu priniesť výsledný produkt s veľmi rozdielnymi vlastnosťami. Taktiež zmena v umiestnení vrstvy vo vnútri laminátov môže viesť k výraznej variabilite v mechanických vlastnostiach. Navyše posledné výskumy ukazujú, že môže existovať silná spojitosť vo variabilite architektúry priadze a vo veľkom rozptyle permeability v textílii.

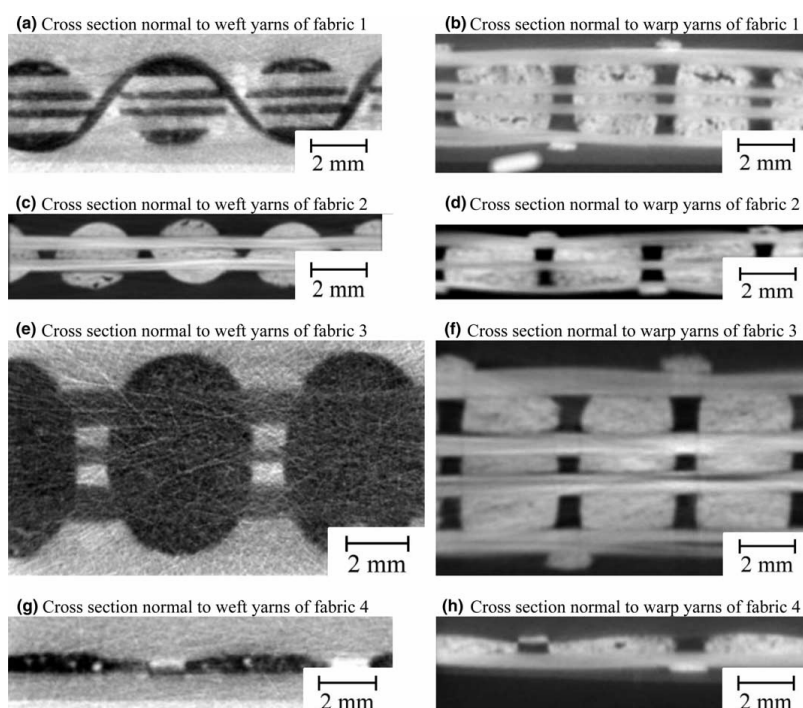
V [25] je hlavným cieľom práce preskúmať rozptyl v 3D ucelenej tkanej štruktúre. Znalosť mikroštruktúry je dôležitá pri predikcii správania častí kompozitov, pretože poloha a orientácia priamo vplýva na mnohé vlastnosti [26].

Z [25] vyplýva, že by bolo oveľa praktickejšie vypočítať tieto materiálové veličiny priamo z vnútornej geometrie 3D textílií, a to je dôvod prečo je nutné použiť vysoko presné vstupné dáta pre tieto modely. Tieto informácie môžu byť ďalej použité ako vstupné dáta do textilného softwaru ako napr. WiseTex – integrovaný textilný procesor pre mezomechanickú, hydrodynamickú a štrukturálnu analýzu.

Cieľom príspevku [25] bolo zaviesť spoľahlivú účinnú a nedeštruktívnu metódu na charakterizovanie vnútornej geometrie textilných súčastí. Ako nedeštruktívna metóda na zobrazenie poškodení bola zvolená X-ray počítačová tomografia, pretože poskytuje 3D zobrazenie architektúry priadze.

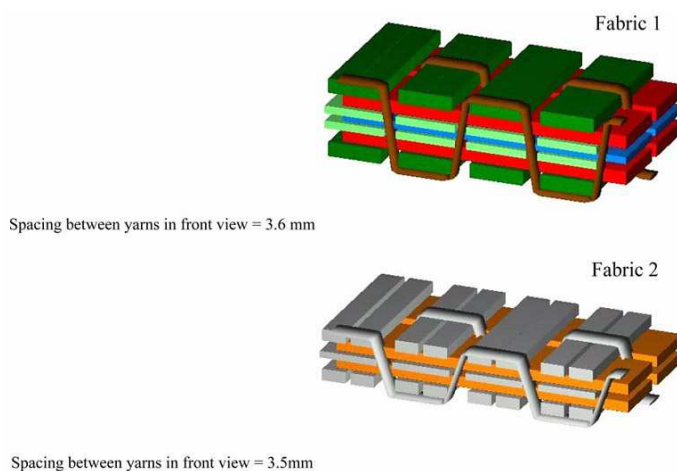
Pri meraní s CT nie je totiž potrebné rezať a leštiť vzorky, čo je veľkou úsporou času. Jedinou nevýhodou tejto metódy je skutočnosť, že získanie obrazu priečneho rezu

v automatickom režime je časovo náročné. Na Obr.23 môžeme sledovať priečne rezy kompozitov zhotovené pomocou μ CT.



Obr. 23 priečne rezy kompozitov zhotovené pomocou μ CT

Na základe výsledkov z [25], kde bola porovnávaná X-ray μ CT s optickou mikroskopiou a s metódou povrchového merania môžeme zhodnotiť, že X-ray μ CT je spoľahlivá metóda pre charakterizovanie vnútornej geometrie 3D nestlačenej textílie. Tým pádom výsledné dáta môžu slúžiť ako podklad pre počítačové modelovanie textílií a textilných kompozitov vid'. Obr.24.



Obr. 24 WiseTex modely rôznych 3D textílií

2.4.5 Výstup z mikro CT ako vstup pre rapid prototyping a FEM

V dnešnej dobe je v medicíne použitie CT tomografie už bežnou rutinou. Avšak v poslednom čase sa práve v tejto oblasti začali výstupy z CT používať na 3D rekonštrukcie rôznych častí ľudského tela a ich následnú „výrobu“ za pomoci techniky rapid prototyping (3D tlač). Informácie získané z CT musia byť konvertované do formátu STL (Standard Triangle Language), ktorý je zrozumiteľný pre RP tlačiarne [28].

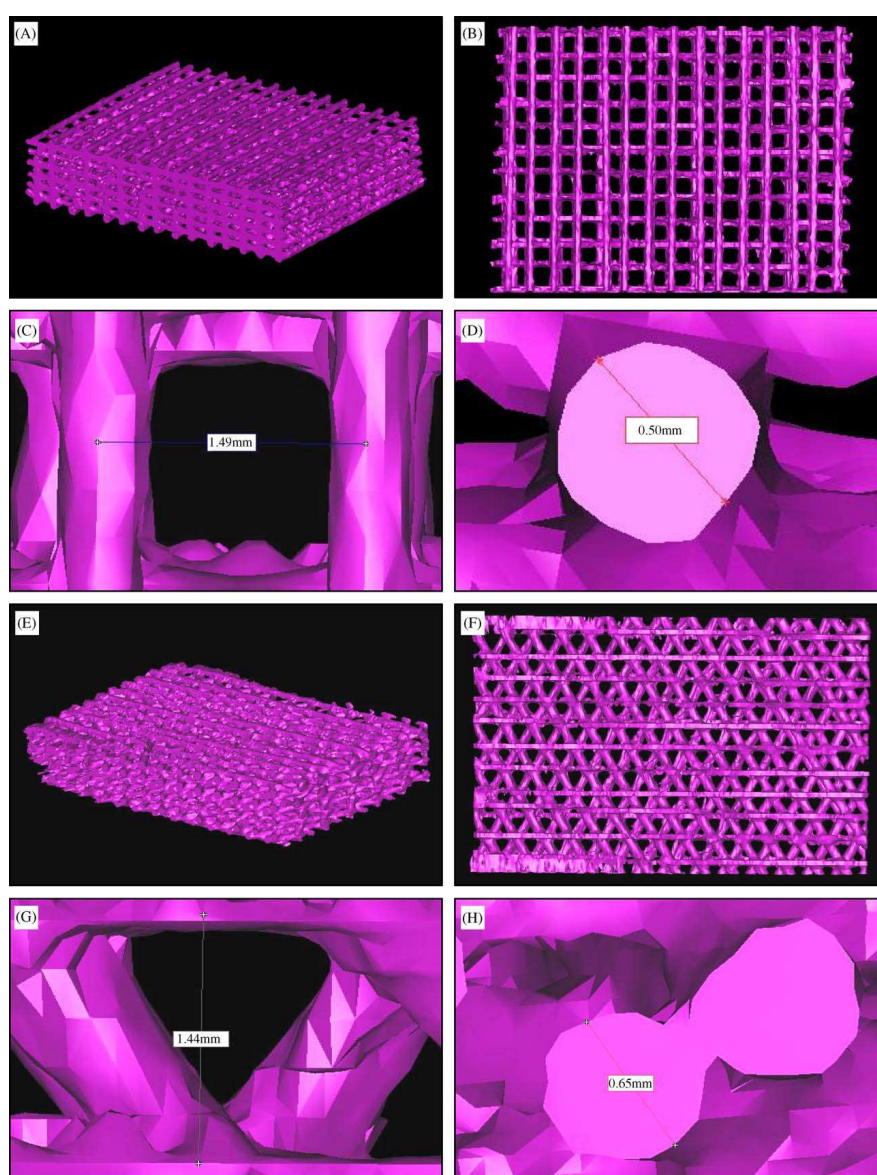
Metóda mikro CT sa javí ako veľmi výhodná a použiteľná aj v iných oblastiach a to napr. pri testovaní mechanických vlastností scaffoldov. Ako sa uvádza v [28], pri skúmaní scaffoldov je nutné vykonať testy pre stanovenie mechanických vlastností, no väčšina týchto testov je deštruktívna. Preto bolo potrebné zvoliť nedeštruktívny prístup. Výskumníci zvažovali použitie FEM (finite element modeling) ako alternatívu pre mechanické testovanie a simuláciu vlastností. FEM vyžaduje presné vstupné informácie o 3D štruktúre a vnútornej architektúre, ktoré môžu byť získané práve pomocou mikro CT skenovania.

Potenciál mikro CT skenovania je taktiež demonštrovaný vo výskume [28], kde bola hodnotená štruktúra polymérneho scaffoldu, vyrobeného technikou rapid prototyping. Bohužiaľ v tejto štúdii nie je uvedené, či na výrobu modelu scaffoldu RP technológiou boli použité výstupy z mikro CT, alebo bol model navrhnutý pomocou CAD systému, avšak reálne sa javia obidve možnosti. Pri tomto experimente boli dva geometricky rozdielne scaffoldy vyrobené pomocou RP techniky, skenované na prístroji „Skyscan 1076 in vivo microtomograph“ pri rozlíšení 35 μ m. Meranie bolo prevedené pri týchto podmienkach : averaging - 5, 1mm hliníkový filter, rotation step = 0,8°, stupeň otáčania = 180°. Rekonštruované dáta boli nahrané do programu Mimics a zobrazené pri thresholdingu od - 793 do -83 Hounsfieldovej stupnice (HU). Determinanty architektúry týchto scaffoldov predstavuje priemer zvolenej trysky a „medzery“. Hrúbka stien je ovplyvnená priemerom trysky a medzera ovplyvňuje vzdialenosť susedných stien spoločných vrstiev. Táto štúdia hľadala koreláciu medzi týmito parametrami, a parametrami nameranými v skutočnom vyrobenom scaffold. Výsledky z mikro CT ukázali, že RP prístup bol presný, keďže nameraná veľkosť pórov sa zhodovala s veľkosťami „medzier“. Avšak kvôli dynamike toku pretláčaných filamentov nastali odchýlky v hrúbke stien v porovnaní s priemerom trysky. Preto boli

pozorované mierne deformácie týchto stien vid'.Obr 25- H. Pomocou mikro CT analýzy bola zistená porozita, podiel plochy povrchu a objemu a interkonektivita pórov vid'. Tab.1.

Tab. 1 vlastnosti 2 scaffoldov vyrobených RP technikou - namerané pomocou mikro CT [28]

No	Material	Angle	Nozzle size (mm)	Fill gap (mm)	Porosity-pycnometer (%)	Porosity-mimics (%)	Surface area/volume-mimics (mm ² /mm ³)	Interconnectivity (%)
1	Copolymer of PEG, PCL and PLA	0°/90°/180°	0.5	1.5	72.05±0.41	74.99	8.65	100
2	Copolymer of PEG, PCL and PLA	0°/60°/120°	0.5	1.5	70.60±0.67	75.45	9.07	100



Obr. 25 (A-D) sú 3D modely scaffoldu 1, (E-H) patria scaffoldu 2, (A) a (E) – izometrický pohľad, (B) a (D) – pohľad zhora. Veľkosť „medzier“ – (C) a (G), na (D) a (H) vidíme veľkosť priemeru stien [28]

2.4.6 Stanovenie porozity pomocou mikro CT & rôzne experimentálne techniky stanovenia porozity

Ako bolo vyššie spomenuté techniky stanovenia porozity materiálov môžeme rozdeliť na teoretické a experimentálne.

V publikácii [28] boli na zisťovanie porozity scaffoldov použité nasledujúce metódy, zistené vlastnosti boli vzájomne porovnávané vid'. tabuľka 2. Medzi najzákladnejšie teoretické metódy patrí napr. už spomínaná pórovitosť vyjadrená cez zaplnenie (Unit cube analysis a mass technique), stanovenie porozity z mernej hmotnosti, z plošného zakrytia tkaniny, modifikovaná plošná porozita. Avšak existujú ďalšie teoretické výpočty, ktoré sú založené na podobnom princípe s malými rozdielmi ako napríklad Archimedova metóda a technika vytlačania tekutiny (liquid displacement technique) a iné. Experimentálne techniky zahŕňajú napr. SEM, ortuťovú porozimetriu, héliovú pycnometriu, plynnú adsorpciu, prietokovú porozimetriu (flow porosimetry), softwarovú analýzu merania pórov pomocou optickej analýzy LUCIA [29], [7] a nakoniec meranie porozity pomocou mikro CT. Spomínané metódy je možno bližšie naštudovať práve v týchto publikáciách. My sa však budeme venovať hlavne stanoveniu porozity pomocou mikro CT. Flexibilita mikro CT analýzy dovoľuje skúmať aj také štruktúry ako napríklad peny, textílie a nanovláknenné scaffoldy.

Tab. 2 zhrnutie vlastností, ktoré je možné zistiť jednotlivými metódami [14]

A summary of the properties that can be derived (denoted by +) by the individual techniques and those that cannot be (denoted by –)

	Theoretical method	SEM	Mercury porosimetry	Gas pycnometry	Gas adsorption	Flow porosimetry	Micro CT
Porosity	+	Qualitative	+	+	+	–	+
Surface area/ volume	–	–	+	–	–	–	+
–	–	+	Interconnectivity	–	Qualitative	–	–
Pore size	–	+	+	–	+	+	+
Strut/wall thickness	–	+	–	–	–	–	+
Anisotropy	–	Qualitative	–	–	–	–	+
Cross section area	–	Qualitative	–	–	–	–	+
Permeability	–	–	+	–	–	–	Dependent on software
Other parameters that can be derived	Nil	Nil	<ul style="list-style-type: none"> • Pore volume vs. pore size. • Pore cavity to pore throat ratio. • Pore cavity sizes vs. pore throat sizes. • Cumulative surface area vs pore size. • Pore tortuosity. • Sample compressibility 	Nil	<ul style="list-style-type: none"> • Pore shapes • Cumulative pore size distributions. • Pore volume and areas of mesopores and micropores 	<ul style="list-style-type: none"> • Effects of compressive stresses can be studied. • Pore size distributions 	<ul style="list-style-type: none"> • Observation of pore shape and morphology.

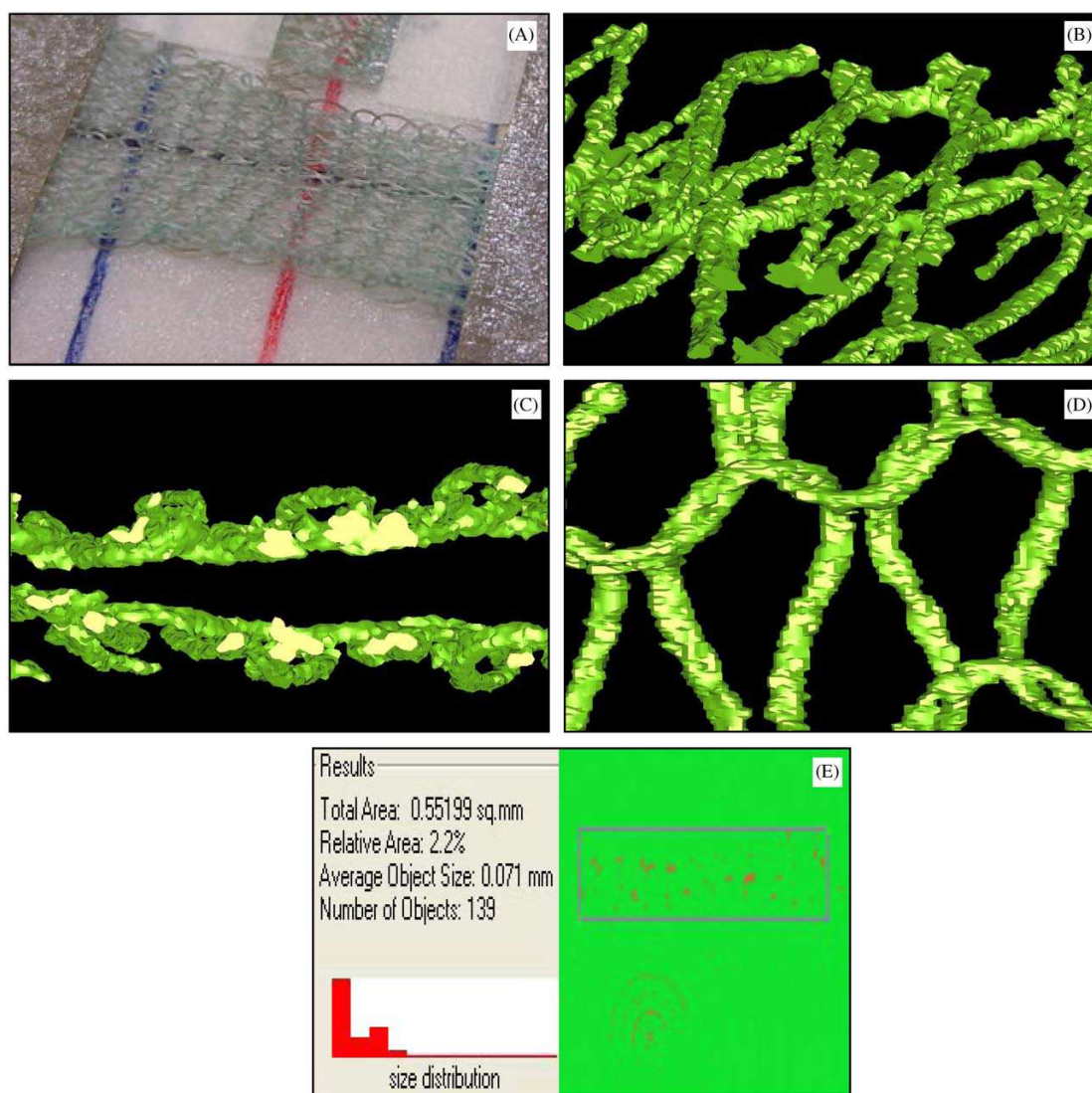
Other drawbacks	<ul style="list-style-type: none">● Not precise due to the inaccurate measurements of the linear dimensions of the scaffold cube.	<ul style="list-style-type: none">● Physical sectioning required.● Destructive assay.● Only superficial regions are analyzed.	<ul style="list-style-type: none">● Does not account for closed pores.● Sample compression.● Mercury reacts with metals.● Assumption of prefect cylindrical pores.● Toxic and destructive assay.	<ul style="list-style-type: none">● Not precise due to inaccurate measurements of the linear dimensions of the scaffold cube.● Does not account for closed pores.	<ul style="list-style-type: none">● Erroneous measurements are encountered for low surface area samples.● Can be time consuming.● Does not account for closed pores.	<ul style="list-style-type: none">● Porosity and cross sectional area values are prerequisites for the calculation of the surface area of through pores.● Does not account for closed and blind pores.	<ul style="list-style-type: none">● Thresholding difficulty● Beam hardening
Scaffolds with regular geometry	Y	Qualitative	Y	Y	Y	Y	Y
Foams	Y	Qualitative	Y	Y	Y	Y	Y
Textile scaffolds	N	Qualitative	N	N	Y	Y	Y
Nanofiber scaffolds	N	Qualitative	N	N	Y	Y	Y

Other useful characteristics and drawbacks are also shown. The feasibility of applying these techniques on foams, textile and nanofiber scaffolds are as indicated. Y means suitable while N means not suitable.

MikroCT umožnilo skúmať morfológickú štruktúru pri výskume permeability scaffoldov [14] a poskytlo veľmi komplexný súbor dát. Boli realizované napríklad merania objemu scaffold materiálu, plocha povrchu, hrúbka stien, a veľkosť pórov. Pomocou treshold inverzie bola zobrazená sieť pórov a tak mohla byť preštudovaná interkonektivita pórov. Scaffoldy s takouto zložitou štruktúrou je možné pozorovať pomocou mikroCT práve kvôli možnosti digitálne izolovať akýkoľvek zvolený geometrický priestor v ich architektúre. Práve táto funkcia poskytuje kľúčovú výhodu oproti iným technikám ako napr. ortuťovej a prietokovej porozimetrii. Vo vnútri takto vyrezanej kocky scaffoldu môže byť zmeraný práve objem a plocha povrchu materiálu, a tým poskytuje výpočet porozity a podiel povrchu a objemu. 3D zobrazovanie umožňuje pohľad zblízka na akúkoľvek danú oblasť, a tým poskytuje možnosť pozorovať tvar pórov, ich veľkosť a hrúbku stien zblízka. Tým, že bol invertovaný threshold, bol vytvorený tzv. negatívny obraz, ktorý zachytáva iba póry. Po zmeraní celkového objemu pórov a objemu prepojených pórov, mohla byť vyjadrená interkonektivita.

Jedným z pokusov popísaných v [14] je hodnotenie vhodnosti použitia metódy mikroCT analýzy na analýzu jemného flexibilného scaffold pletiva. Je pochopiteľné, že takéto riedke jemné textilné pletivá predstavujú pri hodnotení scaffoldov problém. Porozita stlačiteľných a riedkych pletív nemôže byť odvodená cez teoretické výpočty, héliovou pycnometriu alebo adsorpciu, pretože všetky tieto metódy vyžadujú „vyrezanú kocku“

s presnými rozmermi, čo je v tomto prípade dosť zložité. Kvôli svojej stlačiteľnosti by taktiež výsledky z ortuťovej porozimetrie boli chybné. Pri použití SEM síce môžu byť zmerané veľkosti pórov a hrúbka stien, ale SEM poskytuje iba kvalitatívne informácie ohľadom porozity a interkonektivity. Preto bolo v tomto výskume použité mikroCT, a vzorka bola poly D,L-lactide-coglykolidová (PLGA) pletenina z 160 μ m hrubých filamentov. Dvojvrstvová pletená štruktúra tohto scaffoldu bola pozorovaná pri rozlíšení 18 μ m vid'. Obr.(26). Digitálnou analýzou bola vypočítaná porozita (94,83%), pomer plochy k objemu (35,05 mm² mm⁻³), interkonektivita (100%) a priemerná plocha rezu (0,57mm²). Tento experiment potvrdil vhodnosť mikroCT metódy pri štúdiu vzoriek tohto typu, ktoré sú inými metódami takmer nemerateľné.



Obr. 26 PLGA pletenina na A bola hodnotená pomocou mikro CT skenovania ; 3D modely (B-D) ; Izometrický (B), bočný (C), a pohľad z vrchu. Na (E) vidíme vypočítané plochy rezov. Obdĺžnik približuje samotné filamenty scaffoldu. [14]

2.5 Skúmaný materiál

V nasledujúcej kapitole je bližšie popísaný a charakterizovaný materiál, ktorý bol zvolený k experimentu tejto práce. Ide o záťažnú jednolícnu pleteninu využívanú na výrobu tepluvzdorných ochranných rukavíc.

Ochranné dvojvrstvové prstové rukavice, vyrobené z materiálu DuPont™ NOMEX® a KEVLAR®, chránia proti tepelným rizikám (žiar a plamene). Základné informácie sa nachádzajú v tabuľke 3. V experimentálnej časti práce prebehne analýza vrchnej vrstvy tejto rukavice OVENBIRD (Nomex, Kevlar) (obr.27).



Obr. 27 ochranná pracovná rukavica OVENBIRD

Tab. 3 základné údaje výrobku

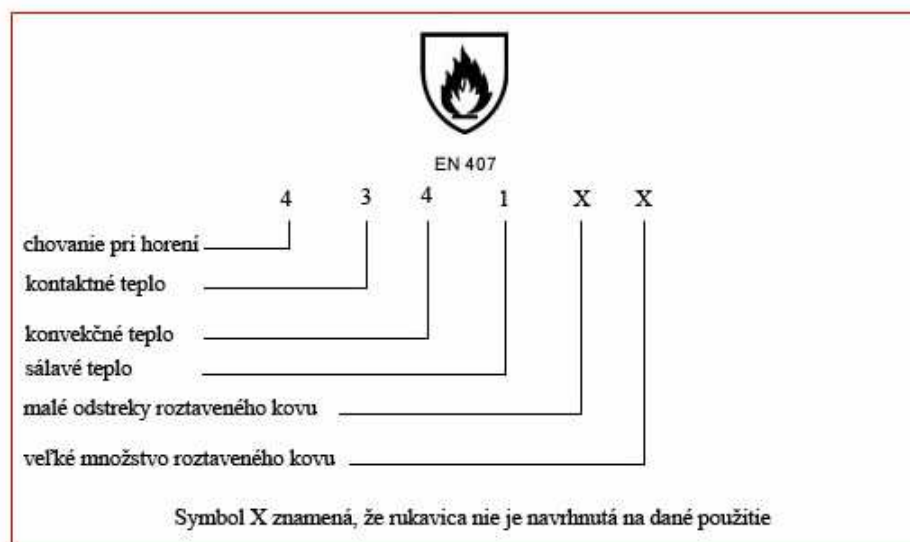
vrchný materiál	85% Nomex, 15% Kevlar
vnútorný materiál	100% Bavlna
druh textílie	pletenina
väzba	jednolícna, záťažná
dĺžka	27 cm
ochrana pred kontaktným teplom	350°C
normy	EN407, EN388

Ochranné rukavice spĺňajú nasledujúce normy:

EN 407 - Ochranné rukavice proti tepelným rizikám (žiar a plamene) :

Rozsah : Európska norma, ktorá určuje metódy skúšania a všeobecné požiadavky, klasifikáciu a značenie rukavíc, určených k ochrane proti žiaru alebo plameňom (plamene, kontaktné teplo, konvekčné teplo, sálavé teplo, malé odstreky kovov alebo veľké odstreky roztaveného kovu) vid' obr. 28.

Kritéria účinnosti pri pôsobení žiaru a plameňov : tepelný výkon : určená úroveň účinnosti pre každú z nasledujúcich metód skúšania závisí na predpokladanej oblasti použitia rukavíc. Prevedené sú iba skúšky, ktoré sa týkajú rizík pri predpokladanom použití koncovými užívateľmi [31].



Obr. 28 norma EN 407 – legenda k číselnému hodnoteniu [31]

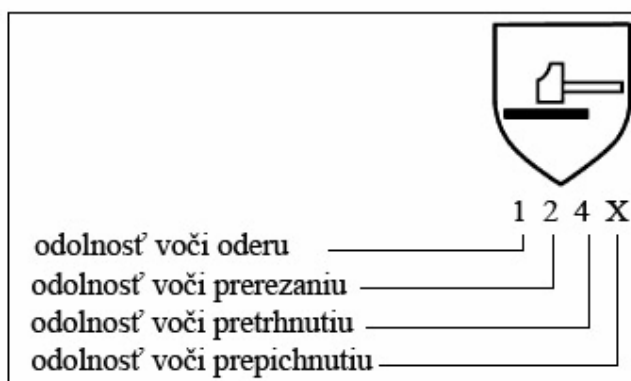
Vysvetlivky k číselnej legende normy EN 407 sú uvedené v prílohe B (tab.21).

EN 388

Táto norma sa vzťahuje na všetky typy ochranných rukavíc ohľadom fyzického aj mechanického poškodenia spôsobeného oderom, porezaním, prepichnutím a pretrhnutím (obr.29) [31].

- a. Odolnosť proti oderu:** je založená na počte cyklov, ktoré sú potrebné k predraniu vzorky rukavice.
- b. Odolnosť proti prerezaniu:** je založená na počte cyklov, ktoré sú potrebné k prerezaniu cez vzorku pri konštantnej rýchlosti.
- c. Odolnosť proti pretrhnutiu:** je založená na množstve sily potrebnej k pretrhnutiu vzorky.
- d. Odolnosť proti prepichnutiu:** je založená na množstve sily potrebnej k prepichnutiu vzorky bodcom so štandardizovanou veľkosťou [31].

Vo všetkých prípadoch [0] znamená najnižšiu úroveň výkonu vid'. Príloha B Tab (22):

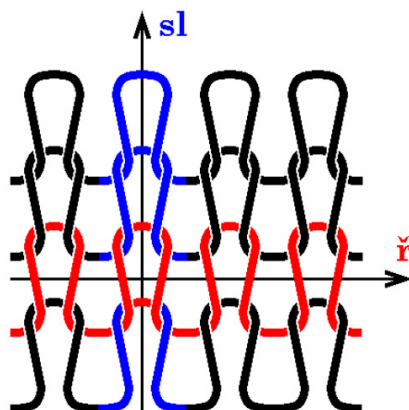


Obr. 29 norma EN 388 - legenda k číselnému hodnoteniu [31]

2.5.1 Zát'ažná pletenina

Pretože predmetom tejto práce je primárne skúmanie porozity zát'ažnej pleteniny, je vhodné zdefinovať tento pojem a taktiež si v nasledujúcej kapitole predstavíme jej základné štruktúrne prvky.

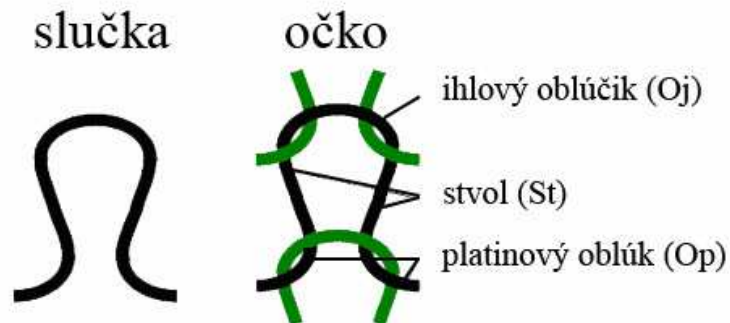
Zát'ažná pletenina predstavuje plošnú textíliu vytvorenú vzájomným previazaním jednej nite pomocou pletiarkej väzbovej techniky. Jednolícna zát'ažná pletenina sa skladá z niekoľkých stavebných prvkov a to zo „slučky“ resp. „očka“. Tie vytvárajú stĺpiky (sl) a riadky (ř) (Obr.30). Hodnotenie stavu pletenín, čo sa štruktúry týka, je dôležitá, avšak veľmi náročná úloha, pretože pletenina má veľkú schopnosť meniť svoje rozmery. Pletenina je nestabilná skoro po jej zhotovení [32]. Následne štruktúra takejto plošnej textílie je veľmi variabilná, čo sa týka predovšetkým rozmerov štruktúrnej jednotky pleteniny.



Obr. 30 model zát'ažnej jednolícnej pleteniny [32]

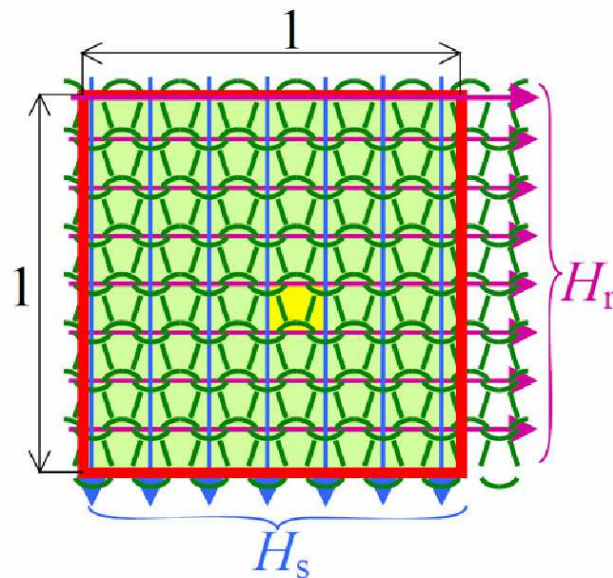
Pletiarske očko je zložené z týchto častí (Obr.31):

- ihlový oblúčik o_j t.j. horná časť oka spojujúca steny oka
- platinový oblúk o_p t.j. spodná časť oka spojujúca steny oka
- steny, alebo stôl s_t ako spojnice ihlových a platinových oblúčikov



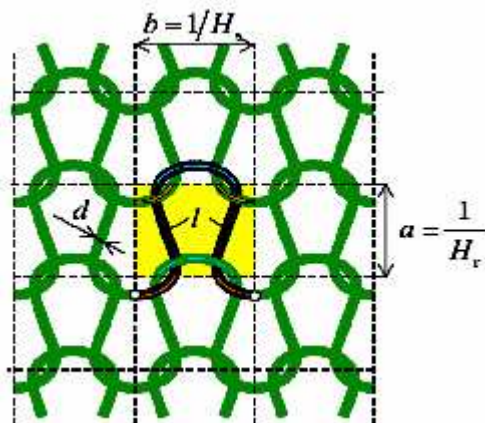
Obr. 31 stavebné prvky oka pleteniny [33]

Jednou z dôležitých charakteristík pleteniny je tzv. hustota pleteniny. Uvažujme štvorcovú časť pleteniny s rozmermi 1×1 . Potom hustotu riadku H_r môžeme charakterizovať ako počet riadkov pripadajúcich na jednotku dĺžky a hustotu stĺpikov H_s ako počet stĺpikov pripadajúcich na jednotku dĺžky (Obr.32) [33].



Obr. 32 štvorcová časť pleteniny – hustota riadkov a stĺpikov [33]

Opakujúca sa štruktúrna jednotka pleteniny je tvorená žltým obdĺžnikom so stranami a a b vid' obr.33. Strana a predstavuje rozteč riadku (vzťah 1) a strana b rozteč stĺpikov (vzťah 2).



Obr. 33 štruktúrna jednotka pleteniny (žltý obdĺžnik)

rozteč riadkov:

$$a = \frac{1}{H_r} \quad (1)$$

rozteč stĺpikov:

$$b = \frac{1}{H_s} \quad (2)$$

Dĺžka nite vo vnútri základnej štruktúrnej jednotky je rovná dĺžke oka l . Z obrázku 33 môžeme vidieť, že oko nie je kompletne, avšak úseky čierneho oka, ktoré zo štruktúrnej jednotky vybočujú, sú totožné, resp. rovnako dlhé, ako úseky susedných zelených očiek, ktoré do tejto štruktúrnej jednotky pleteniny zasahujú.

2.5.2 Zaplnenie a porozita textílií

Prv ako sa dostaneme k samotnému hodnoteniu porozity pomocou mikroCT, je potrebné zdefinovať samotný výraz porozita. Taktiež si stručne predstavíme rôzne dostupné metódy porozimetrií v súčasnosti.

Pod pojmom porozita textílie rozumieme jej vlastnosť, ktorá výrazne ovplyvňuje priedušnosť danej textílie. Podľa Havrdovej [34], obecné považujeme za póry v textílii všetky priestory, ktoré sú za bežných podmienok vyplnené vzduchom. Porozitu je

možné vyjadriť buď ako pomerné číslo z intervalu (0;1), alebo v percentách v intervale (0-100). Porozita teda definuje množstvo vzduchu, ktoré je obsiahnuté v textílii, resp. pri použití percentuálneho vyjadrenia vyjadruje percentuálne zastúpenie vzduchu v textílii. Avšak neposkytuje informácie o jeho rozložení v danej textílii, o veľkosti či tvare jednotlivých pórov alebo o ich vzájomnom usporiadaní. Pokiaľ je však hodnota porozity nízka, zapríčiňuje zníženie komfortu odevných výrobkov.

Porozitu ovplyvňuje tvar priečného rezu vlákna, ktorý určuje ako tesne k sebe vlákna v priadzi priliehajú, a to najmä vo vnútorných oblastiach priadze, dostava tkaniny, resp. hustota stĺpikov a riadkov v pletenine, typ a jemnosť použitej priadze a rovnako aj konečné úpravy textílií napr. kalandrovanie. Rez skúmaných nomexových a kevlarových nití z rastrovacieho mikroskopu je možné vidieť v prílohe C (Obr.68).

Póry môžeme rozdeliť podľa ich výskytu do troch kategórií:

- Póry vo vnútri vlákien
- Medzivláknenné póry - póry vo vnútri nite vytvorené medzi vláknami
- Medzinitné póry - póry vytvorené medzi osnovnými a útkovými priadzami v tkanine a sústavou očiek v pletenine

Porozitu je možné hodnotiť a merať mnohými spôsobmi, ktoré sa od seba pomerne výrazne odlišujú. Určovanie porozity môže byť založené jak na teoretických postupoch, tak aj na praktických experimentálnych metódach. Avšak kvôli zložitosti štruktúry textilných materiálov obsahuje každá z metód určité nepresnosti či už v dôsledku zjednodušujúcich predpokladov, subjektívne nastaviteľných parametrov, alebo nepresnosti merania. Preto je dôležité správne zvoliť metódu hodnotenia pórovitosti s ohľadom na meraný materiál. Niekedy je na dosiahnutie precízneho výsledku vyžadovaná kombinácia rôznych techník. Avšak momentálne najatraktívnejšiu metódu predstavuje práve mikro CT, ktoré patrí medzi nedeštruktívne metódy a zároveň poskytuje komplexné informácie o vnútornej štruktúre skúmaného materiálu [14].

Pri hodnotení porozity danej vzorky je nutné zaviesť tri pojmy a to **zakrytie**, **zaplnenie** a **porozitu**. Tieto tri údaje charakterizujú akú časť objemu / plochy poréznej vzorky tvoria vlákna a akú časť póry resp. vzduch.

2.5.2.1 Zaplnenie

Na definovanie zaplnenia môžu byť použité nasledujúce tri metódy, ktoré uvádza Neckář [33]:

1. Objemová definícia zaplnenia μ :
2. plošná interpretácia zaplnenia μ
3. hustotná interpretácia zaplnenia μ

Objemová definícia zaplnenia μ

Ak by sme uvažovali textilný vlákenný útvar, resp. jeho výrez ako kocku (obr.27), môžeme zaviesť nasledujúcu symboliku:

V ... objem vlákien

V_c ... celkový objem

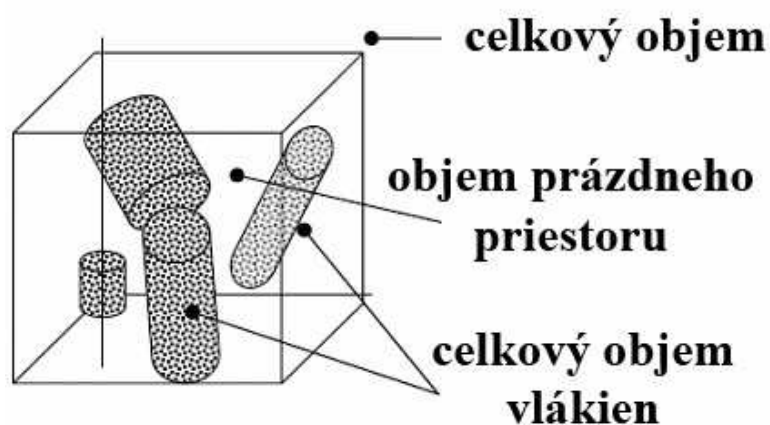
Pričom platí $V \leq V_c$

Objemová definícia zaplnenia μ sa preto vyjadruje nasledovne (vzťah 3):

$$\mu = \frac{V}{V_c} \quad (3)$$

$$\mu \in \langle 0,1 \rangle$$

Pokiaľ je hodnota $\mu = 0$, ide o úplne prázdny priestor, tj. tento útvar neobsahuje žiadne vlákna. Naopak ak je $\mu = 1$, ide o priestor úplne vyplnený hmotou vlákien [33].



Obr. 34 ukážka textilného vlákenného útvaru v pomyslenej kocke

Plošná interpretácia zaplnenia μ

Uvažujme pomyselný hranol, ktorý predstavuje niť s rozmermi $a \cdot b \cdot dh$. Hodnota dh je vlastne diferenciálna výška hranolu – nekonečne malý rozmer \rightarrow zakrivenie segmentov je možné zanedbať. Objem hranolu (celkový) sa potom dá vyjadriť ako $dV_c = a \cdot b \cdot dh = S_c \cdot dh$. V reze takéhoto hranolu sa nachádza určitý počet segmentov N s reznou plochou s^*_j , ktoré sú združené do nite [33]. Ich súhrnná rezná plocha je vyjadrená vo vzt'ahu (4).

$$S_r = \sum_{j=1}^N s^*_j \quad (4)$$

Plošná definícia zaplnenia potom predstavuje súčet plošných rezov filamentov vzťahnutých k celkovej reznej ploche multifilovej nite S_c vid' vzt'ah (5).

$$\mu_p = \frac{S_r}{S_c} \quad (5)$$

Hustotná interpretácia zaplnenia μ

Zaplnenie vlákenného útvaru je možné taktiež vyjadriť tzv. hustotnou interpretáciou.

Uvažujme textilný vlákenný útvar kde:

V ... objem vlákien

V_c ... celkový objem

m ... hmotnosť vlákien

Hustota vlákien ρ je potom vyjadrená vzt'ahom (6) a hustota vlákenného útvaru γ (7).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{m}{V_c} \quad (7)$$

Zo vzt'ahov F a G je možné určiť hustotnú interpretáciu zaplnenia μ [33] vid' vzt'ah (8).

$$\mu = \frac{\gamma}{\rho} \quad (8)$$

2.5.2.2 Porozita

Porozita predstavuje doplnok k zaplneniu tj. relatívnu charakteristiku objemu priestoru (vzduchu) medzi vláknami.

Vyjadrenie objemu priestoru vzduchu medzi vláknami je uvedené vo vzťahu (9).

$$V_p = V_c - V \quad (9)$$

Kde:

V_p ... objem pórov - vzduchu

V_c ... celkový objem

V ... objem vlákien

Vzťah pre porozitu (10, 11, 12) vyzerá potom nasledovne [33]:

$$\psi = \frac{V_p}{V_c} \quad (10)$$

$$\psi = \frac{V_p}{V_c} = \frac{V_c - V}{V_c} = 1 - \left(\frac{V}{V_c} \right) \quad (11)$$

$$\psi = 1 - \mu \quad (12)$$

Porozita pletenín

Porozitu pletenín ψ_p je možné analogicky vyjadriť pomocou vzťahu (13). Na obrázku 35 je znázornený model záťažnej pleteniny a 1 základná štruktúrna jednotka pleteniny s naznačeným pórom.

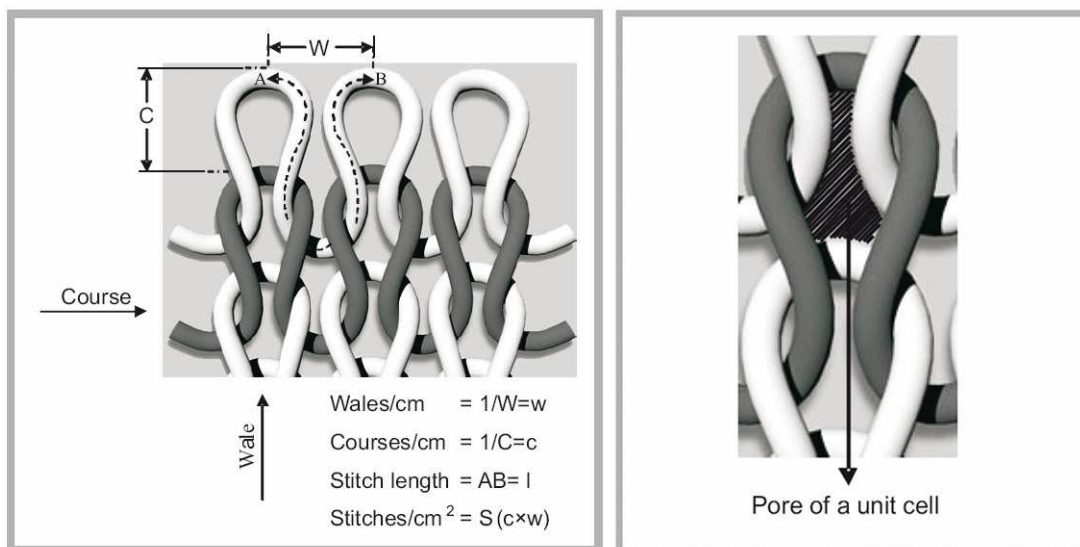
$$\psi_p = 1 - \frac{V_{priadze}}{V_{celkový}} \quad (13)$$

Kde :

ψ_p ... porozita pletenín

$V_{priadze}$... objem priadze v 1 štruktúrnej jednotke pleteniny

$V_{celkový}$... objem základnej štruktúrnej jednotky pleteniny



Obr. 35 model záťažnej pleteniny a detail na plochu póru v štruktúrnej jednotke pleteniny [35]

2.6 Klasické metódy hodnotenia priedušnosti vzduchu

V tejto kapitole si definujeme priedušnosť vzduchu plošných textílií a ukážeme si postup práce na prístroji FX 3300.

Meranie priedušnosti

Priedušnosť vzduchu textilných materiálov je charakterizovaná ako jej schopnosť prepúšťať vzduch za daných podmienok. V laboratórnych podmienkach je priedušnosť štandardne hodnotená podľa normy ČSN EN ISO 9237, ktorá definuje priedušnosť ako rýchlosť prúdiaceho vzduchu cez vzorku textílie za špecifikovaných podmienkach pre meranú plochu, tlakový spád a dobu.

Pre odevné textílie sú podmienky nasledovné:

- meraná plocha 20 cm²
- tlakový spád 100 Pa

Priedušnosť textílií sa teda meria ako rýchlosť prúdu vzduchu prechádzajúceho kolmo danou plochou textílie pri stanovenom tlakovom spáde. Hodnota priedušnosti je závislá na objeme vzduchu prechádzajúceho skúšanou plochou textílie za daný čas. Priedušnosť textílie je v úzkej závislosti na pórovitosti textílie.

2.6.1 Prístroj FX 3300

Prístroj FX 3300 slúži na meranie priepustnosti textílií pre vzduch, resp. na meranie priedušnosti (Obr.36). Tento prístroj vyrába švajčiarska firma TEXTTEST AG. Jeho princíp spočíva vo vytvorení tlakového rozdielu medzi obidvomi povrchmi testovanej textílie a v meraní takto vytvoreného prietoku vzduchu. Testovaná plocha môže byť 5 cm² alebo 20 cm². Hodnoty priepustnosti je možné nastaviť v niekoľkých jednotkách napr. [dm³/s]. Meraná textília sa vkladá do prístroja v celku, nie je potrebné pripravovať vzorku so špeciálnymi rozmermi [36].

Postup merania na prístroji FX3300 je uvedený v prílohe D.



Obr. 36 prístroj na meranie priedušnosti FX3300

3 Experimentálna časť

Experimentálna časť diplomovej práce je zameraná predovšetkým na získanie čo najdokonalejšieho 3D obrazu zvolenej záťažnej pleteniny pomocou mikroCT Skyscan 1174 a jej analýzy, konkrétne vyhodnotenia porozity a jej vzťahu k priepustnosti materiálu. Keďže ide o pomerne novú a zatiaľ nie veľmi využívanú metódu na zisťovanie fyziologických vlastností textílií, bolo potrebné vyriešiť niekoľko dôležitých úloh:

- upevnenie textilnej vzorky,
- meranie porozity pomocou μ CT,
- výpočet porozity klasickým spôsobom,
- analýza vzťahu porozity & priepustnosti vzduchu.

Po vyhodnotení porozity cez teoretické vzťahy a pomocou μ CT budú následne tieto výsledky vzájomne porovnané. Ďalej bude analyzovaná výsledná hodnota priepustnosti vzduchu cez danú vzorku a jej vzťah k porozite pleteniny.

3.1 Meranie porozity pomocou mikro CT SkyScan 1174

Nasledujúca kapitola zaznamenáva prácu na mikrotomografickom zariadení Skyscan 1174 a analýzu výsledkov z neho získaných. Taktiež pojednáva o príprave vhodného upevnenia vzoriek pleteniny na analýzu.

Pri vyhodnocovaní porozity pomocou μ CT skenovania je nutné uvedomiť si niektoré zásadné rozdiely v porovnaní s inými metódami. Pomocou CT snímku sú hodnotené nielen medzinitné, ale aj medzivláknenné póry čo pri teoretických metódach nie je možné. Ide totiž o súčet uzavretých a otvorených pórov do tzv. celkovej porozity (total porosity). Uzavretý pór v 3D je vlastne pospájaná množina „čiernych“ voxelov reprezentujúcich prázdny priestor, ktorý je úplne obklopený zo všetkých strán „bielymi“ voxelmi reprezentujúcimi hmotu. Otvorený pór je definovaný ako akýkoľvek priestor nachádzajúci sa v pevnom objekte, alebo medzi objektmi, ktorý je spojený v 3D s priestorom mimo objektu, alebo objektov (sieť navzájom prepojených pórov). V prípade pleteniny rozumieme otvorenými pórmi priestory medzi priadzou a uzatvorenými pórmi rozumieme priestor vo vnútri priadze, resp. nite. V nasledujúcom

výskume očakávame pomerne veľké percento otvorenej porozity (open porosity) a malé percento uzavretej porozity (closed porosity).

Výhodou metódy μ CT ďalej je, že nevychádza z rôznych teoretických modelov, ktoré vyžadujú zjednodušujúce predpoklady, resp. ideálne podmienky, ale vyhodnocuje konkrétnu reálnu vzorku. Avšak μ CT analýza má aj svoje obmedzenie a to v podobe určovania thresholdu – prahovania. Ide o pomerne subjektívny parameter, ktorý môže výrazne ovplyvniť výsledky. Preto je táto časť vyhodnocovania dôležitá a vyžaduje aj skúsenosť osoby, ktorá meranie vyhodnocuje.

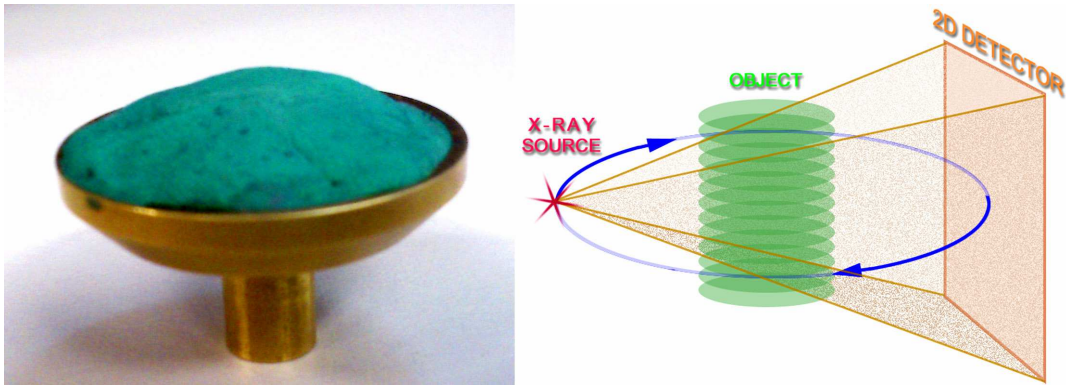
Pred samotným zahájením scanovania, ako už bolo vyššie spomenuté, bolo potrebné navrhnuť vhodné upevnenie textilnej pletenej vzorky v μ CT držiaku.

Konkrétne k prístroju Skyscan 1174 neboli dodané žiadne nástavce, ani špeciálne držiaky na uchopenie textilnej vzorky. Jediným držiakom je kruhový tanierik na nástavci, na ktorom je umiestnená plastelína na fixáciu vzorky (Obr.37).

Tento nástavec so vzorkou sa pri procese scanovania otáča postupne o zvolený počet stupňov tzv. „rotation step“ a otočí sa okolo vlastnej osi buď o 180° alebo až o 360° . Pretože sa nástavec so vzorkou skúmaného materiálu pri scanovaní otáča a s každým pootočením sa zaznamenáva priestorová informácia o tejto vzorke (Obr.37), je nutné, aby sa textilná vzorka v nástavci nepohla. Proces scanovania je pomerne časovo náročný a niekedy trvá aj niekoľko dní. Preto je nutné zabezpečiť vhodnú fixáciu textilnej vzorky.

Do prístroja je možné vkladať len vzorky s maximálnymi rozmermi 3x5 cm (odporúča sa zvoliť menšie rozmery). Upevnenie vzorky pleteniny bolo dosť náročné nielen pre jej ohybnosť, ale aj pre skrúcanie okrajov. Bolo teda potrebné zabezpečiť určitú fixáciu tvaru vzorky, bez toho, aby došlo k jej deformácii, alebo k znehodnoteniu informácie o vonkajšej a vnútornej štruktúre vzorky. Do prístroja Skyscan 1174 je vhodné vkladať vzorky maximálne vyrovnané, nezdeformované, aby bola možná čo najpresnejšia analýza. Na ceste za najkvalitnejším 3D záberom sa experimentálne vyskúšalo viacero spôsobov upevnenia textilnej vzorky. Nakoniec boli navrhnuté dva hlavné prístupy, ako vzorku upevniť a to upevnenie vo vertikálnom smere a v smere horizontálnom.

Všetky nasledujúce merania boli prevedené pri týchto podmienkach : averaging - 20, rotation step = $0,7^\circ$, stupeň otáčania = 360° .



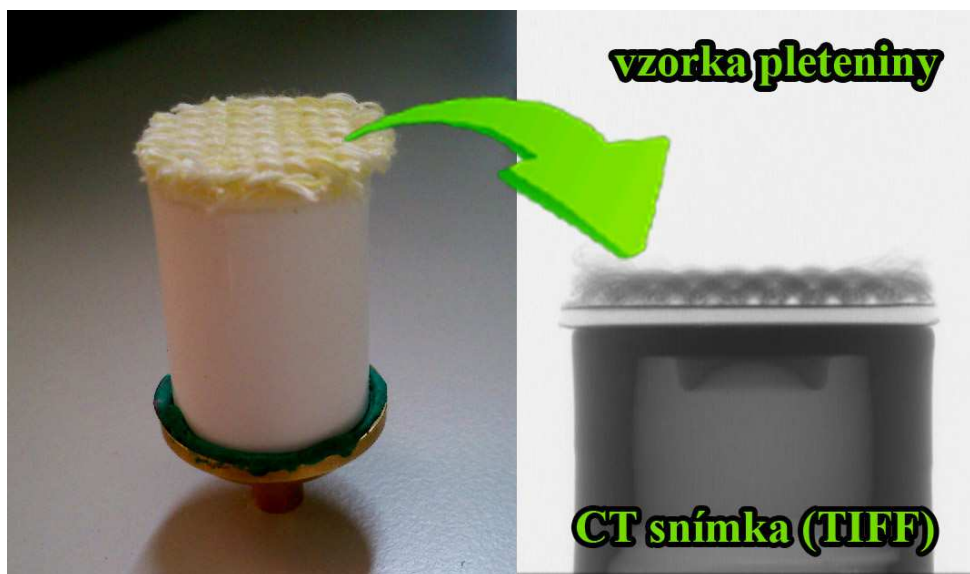
Obr. 37 nástavec na upevnenie vzorky a princíp otáčania vzorky v μ CT Skyscan1174

3.1.1 Horizontálne upevnenie textilnej vzorky

Prvý navrhnutý spôsob upevnenia vzorky spočíval v umiestnení pleteniny v horizontálnom smere na rovnú podložku. V tomto prípade bola vzorka upevnená pomocou obojstrannej lepiacej pásky na valcový stojan – rovnú podložku (Obr.38). Avšak pri tomto meraní bol odhalený problém s vychýlením nástavca na upevnenie vzorky (Obr.37), čo spôsobovalo zjavné nepresnosti v scanoch. Preto bolo nutné vyriešiť zistený problém dodatočným skalibrovaním prístroja za pomoci výrobcov Skyscan.

Pri tomto horizontálnom upevnení vzorky získavame síce menší počet rezov ako pri vertikálnom umiestnení vzorky, avšak aj úplne iný pohľad na rezy vo vyhodnocovacom programe CTan čo v tomto prípade pomôže uľahčiť určenie hodnoty thresholdu – prahovania a vymedzenie jednej základnej štruktúrnej jednotky pleteniny pre analýzu.

V nasledujúcich častiach si predstavíme výsledky z μ CT. Pri navrhnutom horizontálnom upevnení textilnej vzorky budú prevedené 3 analýzy porozity na troch vzorkách (vzorka č.1, 2, 3), z ktorých bude vypočítaná výsledná hodnota porozity skúmanej pleteniny. Avšak najprv bude názorne ukázaný postup pri vyhodnocovaní získaných dát v programe CTan na horizontálne upevnenej vzorke.



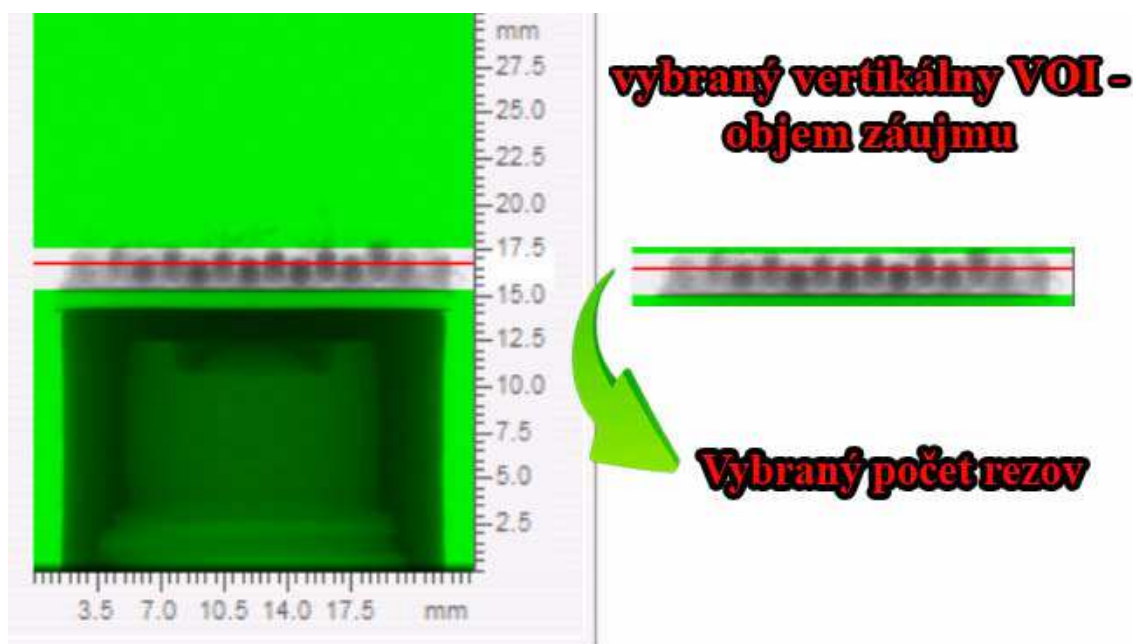
Obr. 38 horizontálne upevnená vzorka pleteniny v držiaku a snímka z CT vo formáte TIFF

3.1.1.1 Postup vyhodnocovania scanov v programe CTan

Samotnej práci v programe CTan predchádza zrekonštruovanie rezov v programe NRecon. Následne je možno v programe CTan otvoriť priečinok v ktorom máme uložené rezy a zvolením jedného z rezov sa nám otvorí celý nascanový objekt. V CTan je možné otvoriť tri druhy prípon (*BMP*, *JPG*, *TIFF*), ale nie všetky sú dostupné pre analýzu. Obrazy v BMP alebo JPG s farebnou RGB informáciou je možné otvoriť na prehliadanie, ale funkcie pre analýzu nebudú funkčné. Preto, aby bola analýza možná, je nutné previesť obrazy do šedej škály.

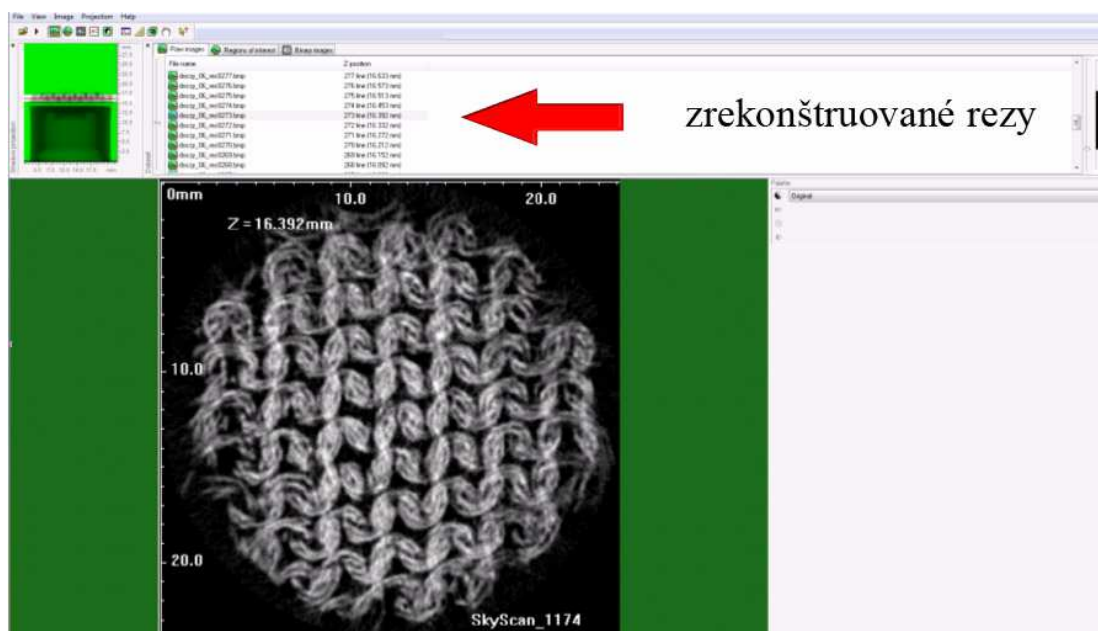
Ďalší krok je určenie tzv. oblasti záujmu ROI (region of interest), resp. VOI.

ROI predstavuje vlastne vymedzenú oblasť, na ktorej sa bude analýza uskutočňovať (informácia o ploche). VOI – objem záujmu (volume of interest) predstavuje súčet všetkých ROI v jednotlivých vrstvách (rezoch) vid'. Obr. 39 (informácia o objeme).



Obr. 39 VOI – volume of interest („objem záujmu“)

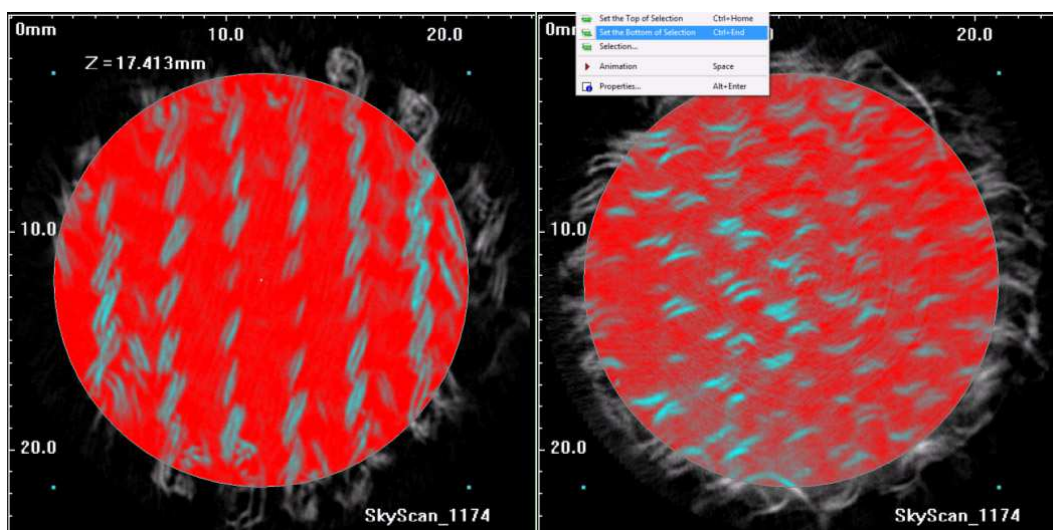
Na Obr. 40 vidíme zrekonštruované rezy pleteniny. Vymedzením VOI sa nevybrané rezy deaktivujú a analýza je prevedená len z aktívnych vybraných rezov. Funkciou „set the top of selection“ a „set the bottom of selection“ zvolíme 1. aktívny vrchný a posledný aktívny rez pleteniny (Obr.41).



Obr. 40 zrekonštruované rezy pleteniny

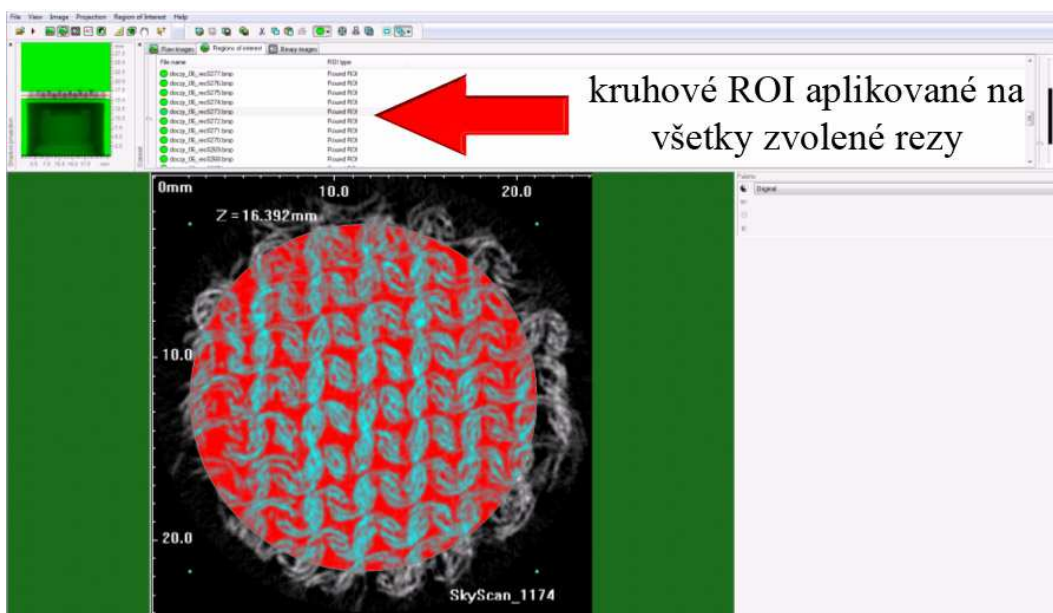
Prvý a posledný aktívny rez je nutné zvoliť s prihliadnutím k tomu, že niektoré riadky a stĺpiky pleteniny vyčnievajú nad výšku druhých, preto je nutné zvoliť určitú strednú

hodnotu pri výbere top a bottom of the selection, aby sme si nezanášali do analýzy zbytočnú chybu.



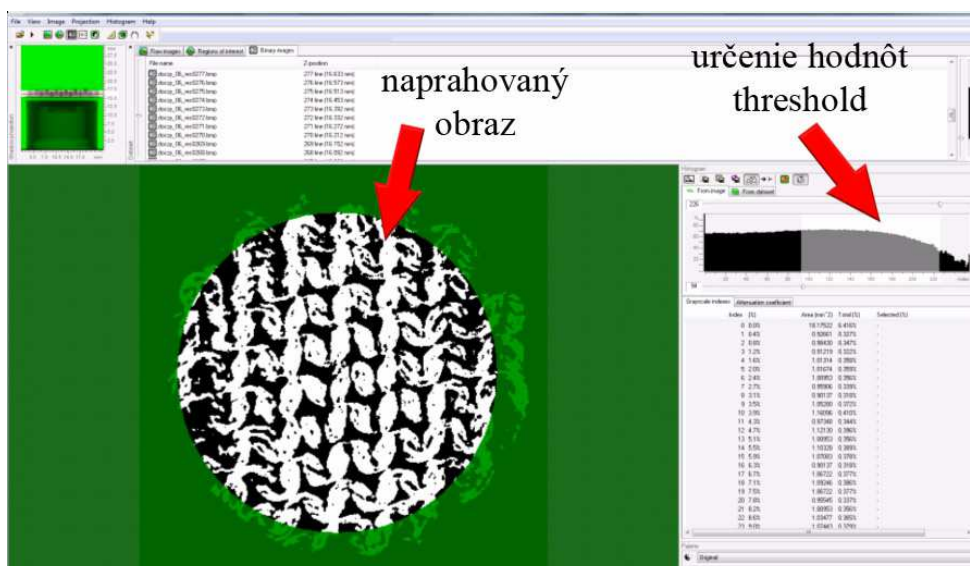
Obr. 41 prvý a posledný aktívny rez pleteniny a aplikácia kruhového ROI

Na jednotlivých rezoch si zvolíme ROI (region of interest) – oblasť záujmu, ktorá môže mať rôzne ľubovoľné, alebo prednastavené tvary. My sme v tomto konkrétnom meraní zvolili kruhovú oblasť záujmu ROI, ktorej veľkosť sme prispôbili tak, aby do analýzy neboli započítané okrajové časti vzorky (obr. 42). Potom sme použili funkciu „copy to All“, aby sa zvolené ROI skopírovalo na všetky zvolené rezy.



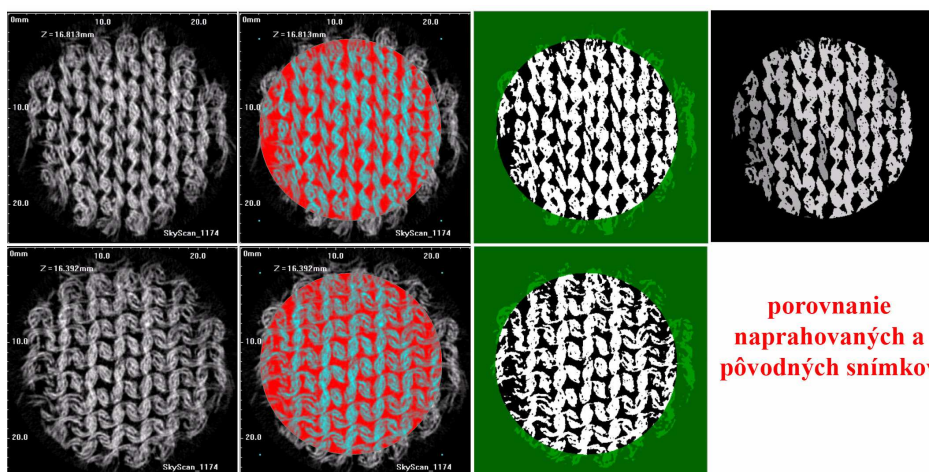
Obr. 42 kruhové ROI aplikované na všetky vybrané rezy

Po zvolení ROI, resp. VOI môžeme prejsť k prevedeniu obrazu do stupňov šede – k tzv. prahovaniu obrazu. Na Obr.43 vidíme tabuľku s histogramom, pomocou ktorého je možné upravovať hodnoty thresholdu. Vznikne nám binárny obraz, v ktorom je hmota znázornená bielou farbou a okolie, resp. v tomto prípade vzduchové póry znázornené čiernou farbou.



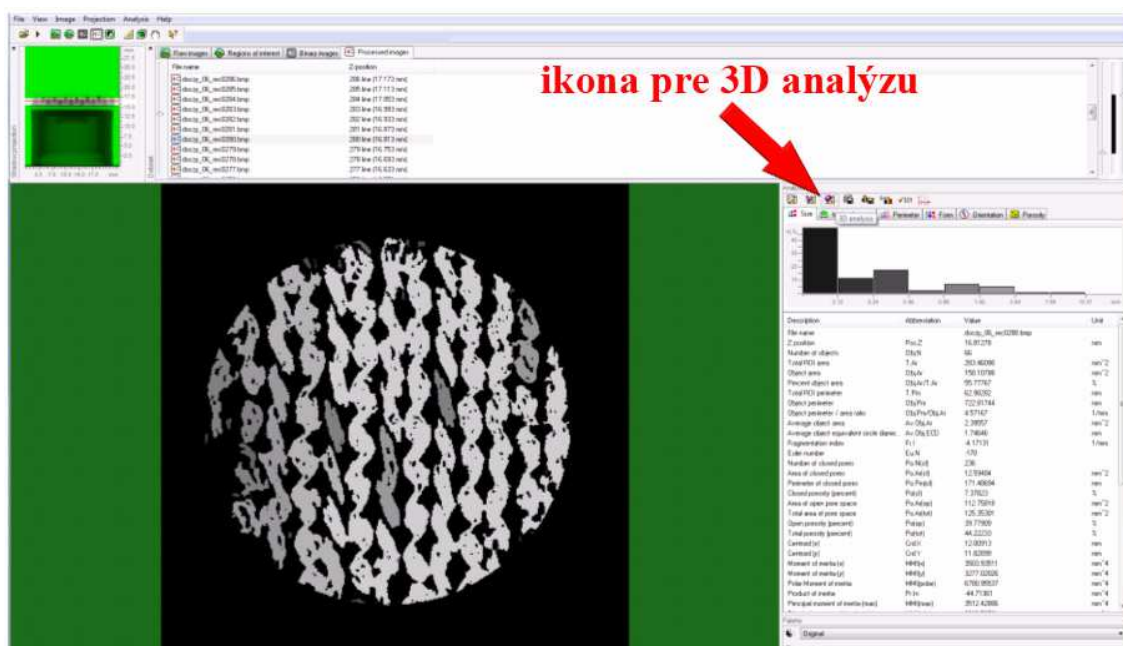
Obr. 43 prahovanie obrazu – určovanie threshold hodnôt

Táto časť procesu je obzvlášť dôležitá a citlivá, pretože zlé určenie tejto hodnoty môže spôsobiť skreslené výsledky. Preto sa úlohe prahovania venoval dostatok času a binarizovaný obraz sa porovnával so „surovým“ obrazom v mnohých vrstvách, aby bol obraz čo najhodnovernejší (Obr. 44).



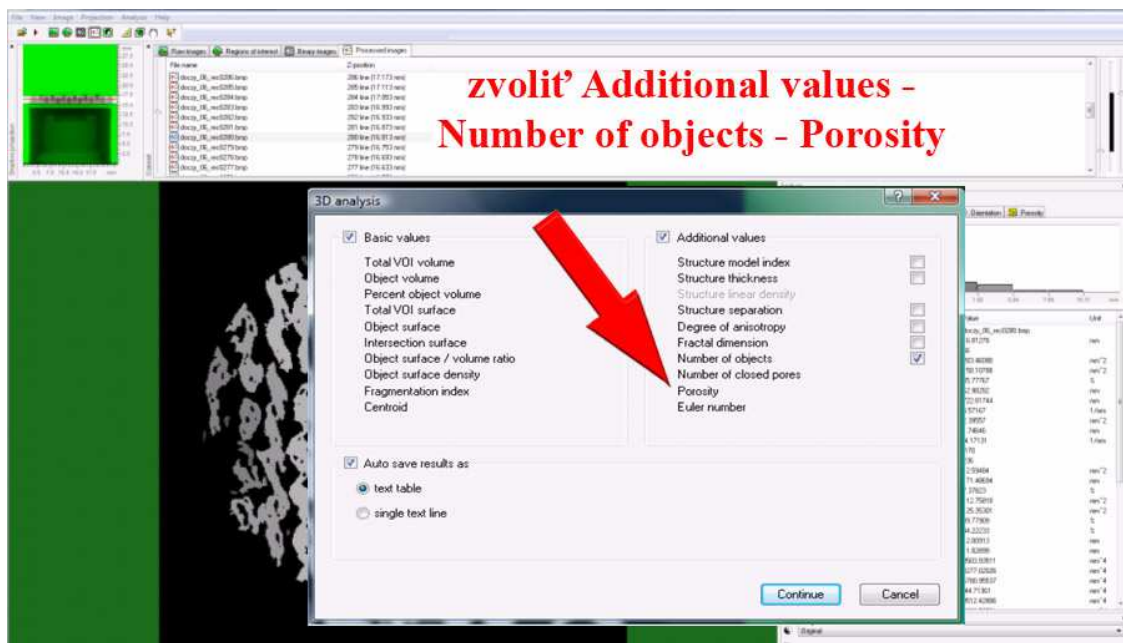
Obr. 44 porovnanie maprahovaných a „surových“ obrazov

Po prevedení obrazu na binárny, je možné prejsť k samotnej 3D analýze. Zvolením nástroju „process image“ sa nám zobrazí voľba 3D analýzy (Obr.45).



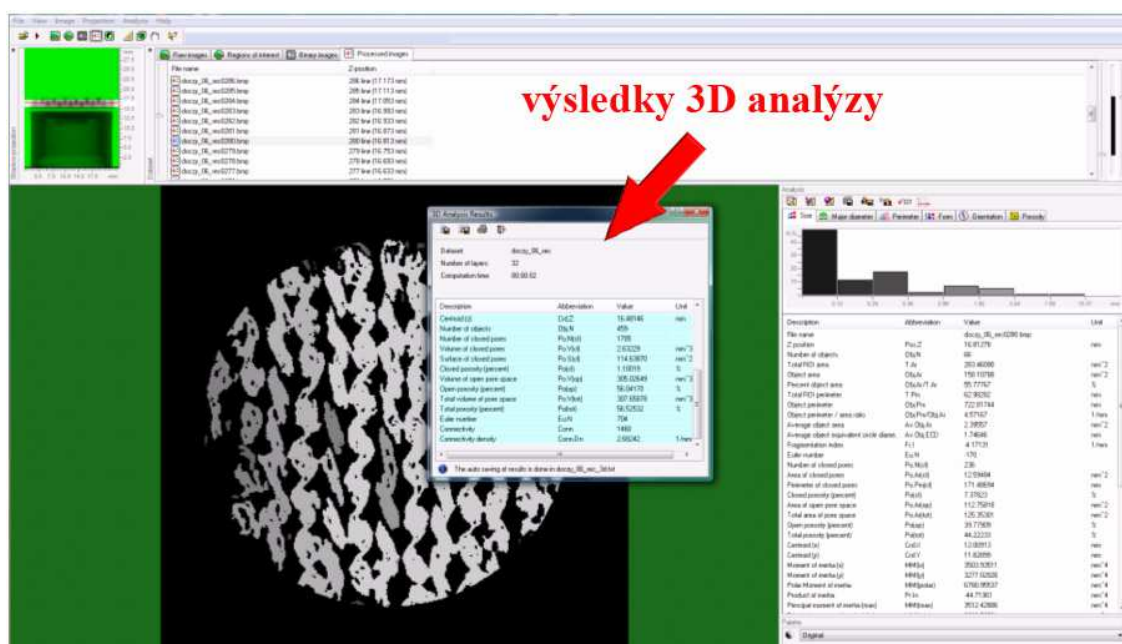
Obr. 45 ikona pre 3D analýzu

Nasleduje zvolenie hodnôt, ktoré chceme aby boli analýzou vyhodnotené. V ponuke „additional values“ nájdeme aj parameter porozita, resp. „number of objects“ (Obr.46). Po zvolení požadovaných hodnôt a príkazu continue, sa spustí analýza.



Obr. 46 nastavenie hodnôt, ktoré majú byť analyzované

Po krátkom čase sa zobrazí tabuľka s výsledkami analýzy (Obr.47), ktorú je možné uložiť taktiež ako textový súbor (txt).



Obr. 47 výsledky 3D analýzy

3.1.1.2 Vzorka č.1 – horizontálne umiestnená

Pretože metóda μ CT umožňuje zvoliť akýkoľvek ROI, resp. VOI, vymedzili sme si ROI o veľkosti 1 základnej štruktúrnej jednotky pleteniny – jedného očka (Obr.48) a skopírovali ROI na všetky zvolené rezy. Podľa vyššie opísaného postupu 3D analýzy bolo prevedených 10 meraní jednej základnej štruktúrnej jednotky pleteniny a ich analýza (Tab.4). Na snímkach je dobre vidieť variabilitu jednotlivých očiek, čo len potvrdzuje, že pri hodnotení pleteniny môže byť pomerne ťažké vychádzať z teoretických modelov, ktoré rátajú so symetriou štruktúry. Analýzou bolo vyhodnotených aj množstvo iných predvolených hodnôt, ktoré je možné vyčítať v txt. súbore, pre nás však bola momentálne dôležitá celková porozita. 3D analýzou je taktiež možné vyhodnotiť už spomínanú otvorenú a uzavretú porozitu vo vzorke.

Tab. 4 výsledky 3D analýzy 1 štruktúrnej jednotky pleteniny (vzorka č.1)

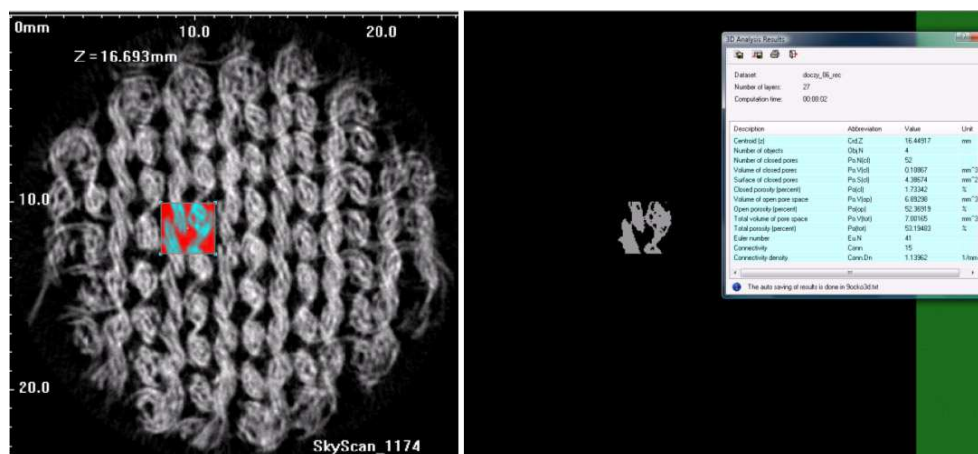
č. merania	počet rezov	otvorená porozita [%]	uzavretá porozita [%]	celková porozita [%]
1	31	57,7	0,34	57,84
2	31	60,52	0,29	60,63
3	31	59,8	0,57	60,03
4	31	60,36	1,03	60,77
5	31	60,79	0,13	60,84
6	31	61,88	0,3	62
7	31	58,15	0,22	58,25
8	31	60,24	0,54	60,46
9	31	60,4	0,51	60,6
10	31	60,42	0,51	60,63
Σ		600,26	4,44	602,05
\bar{x}		60,03	0,44	60,21
s		1,23	0,25	1,25
v		2,06	57,24	2,07

Priemerná hodnota celkovej porozity jednej štruktúrnej jednotky pleteniny je **60,21 %**.

Pri meraní bolo hodnotených 31 rezov a hodnoty thresholdu boli nasledovné:

spodný threshold (low) : 112

vrchný threshold (upper): 250



Obr. 48 3D analýza jednej štruktúrnej jednotky pleteniny

Na rovnakej vzorke sme vykonali ešte 2 varianty merania, kde pri jednej sme zvolili 5 rôzne veľkých kruhových tvarov ROI (Obr.49) a pri druhej variante sme pomocou funkcie polygón vyseletovali vždy niekoľko štruktúrnych jednotiek pleteniny (Obr.50). Taktiež bolo prevedených 5 analýz. Výsledky z meraní pri kruhovom ROI sú uvedené v tabuľke 5 a výsledky z polygónového ROI v tabuľke 6.

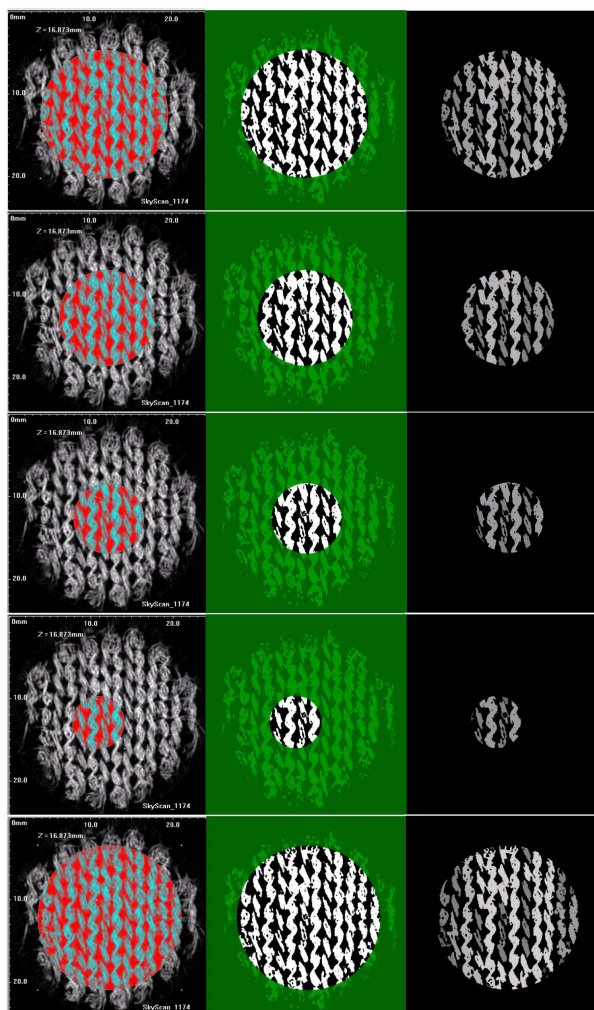
Tab. 5 výsledky pri kruhovom výbere ROI (vzorka č.1)

č. merania	počet rezov	otvorená porozita [%]	uzavretá porozita [%]	celková porozita [%]
1	31	60,85	0,38	61
2	31	59,6	0,47	59,79
3	31	59,87	0,41	60,03
4	31	60	0,37	60,15
5	31	61,67	0,35	61,81
Σ		301,99	1,98	302,78
\bar{x}		60,40	0,40	60,56
s		0,85	0,05	0,84
v		1,41	11,79	1,38

Priemerná hodnota celkovej porozity kruhového ROI je **60,56 %**. Pri meraní bolo hodnotených 31 rezov a hodnoty thresholdu boli nasledovné:

spodný threshold (low) : 112

vrchný threshold (upper): 250



Obr. 49 kruhová oblasť záujmu ROI aplikovaná na všetkých zvolených rezoch – 5 meraní

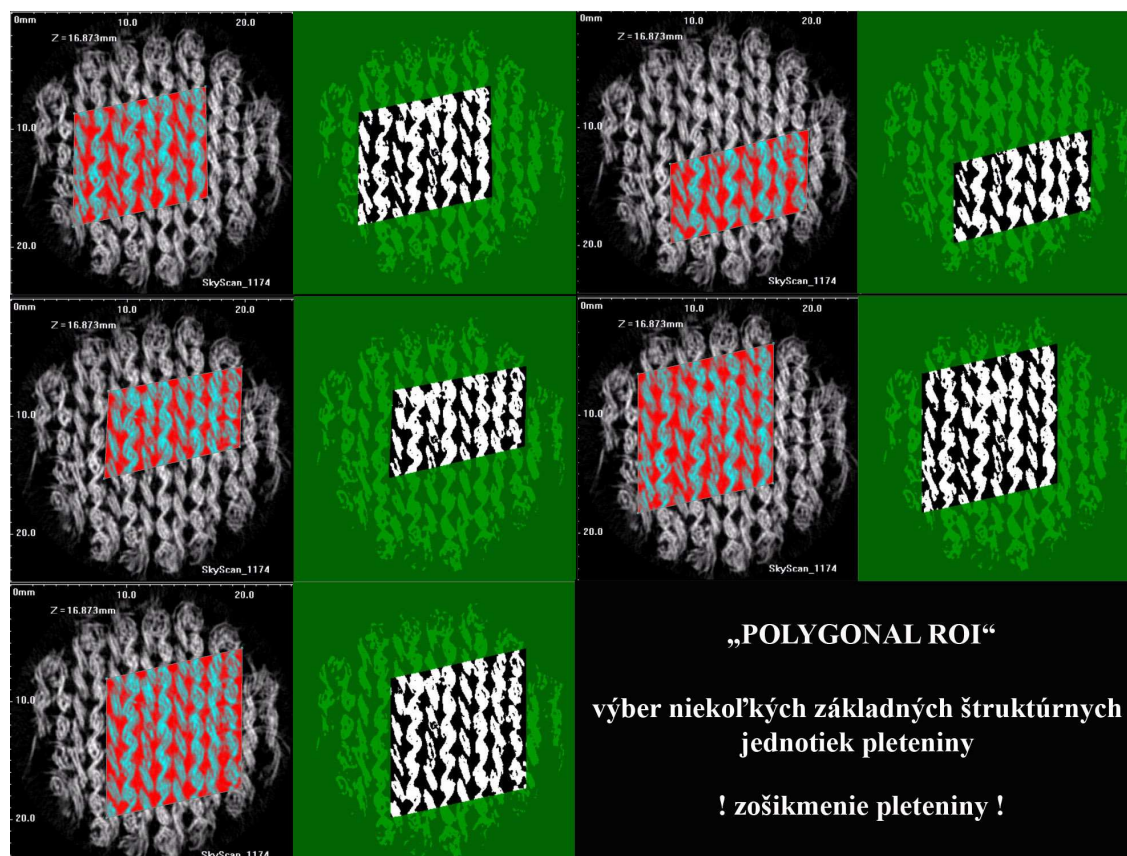
Tab. 6 výsledky z meraní pri polygónovom výbere ROI (vzorka č.1)

č. merania	počet rezov	otvorená porozita [%]	uzavretá porozita [%]	celková porozita [%]
1	31	59,64	0,42	59,81
2	31	61,2	0,47	61,38
3	31	61,14	0,46	61,32
4	31	60,41	0,38	60,56
5	31	61,34	0,43	61,51
Σ		303,73	2,16	304,58
\bar{x}		60,75	0,43	60,92
s		0,72	0,04	0,72
v		1,18	8,25	1,18

Priemerná hodnota celkovej porozity pri polygónovom výbere ROI je **60,92 %**. Pri meraní bolo hodnotených 31 rezov a hodnoty thresholdu boli nasledovné:

spodný threshold (low) : 112

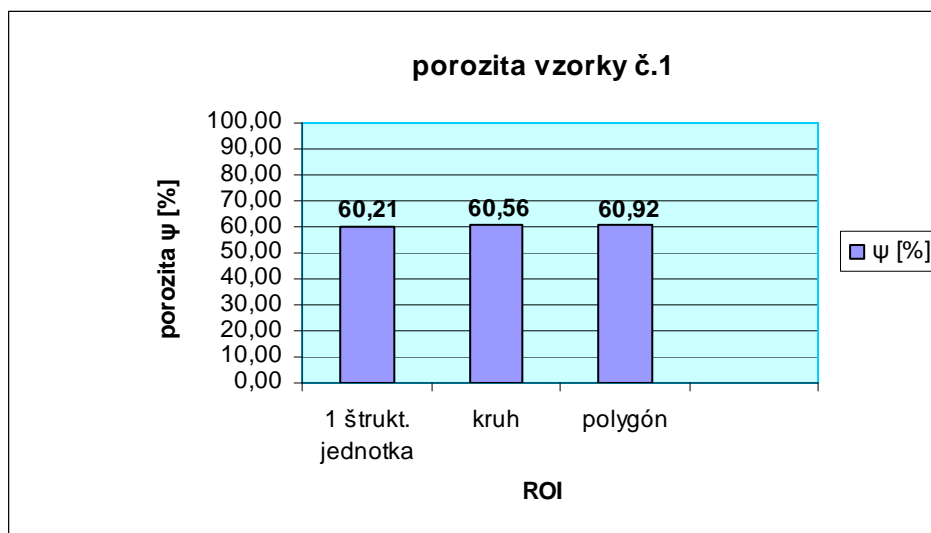
vrchný threshold (upper): 250



Obr. 50 polygónová oblasť záujmu ROI aplikovaná na všetkých zvolených rezoch – 5 meraní

Aby sme získali priemernú hodnotu porozity vo vzorke č.1, bol vypočítaný aritmetický priemer z troch rôznych prístupov vyznačenia ROI (1 štruktúrna jednotka pleteniny, kruhové ROI a polygónové ROI).

Grafické znázornenie hodnôt porozity môžeme vidieť na grafe č.1.



graf 1 hodnoty porozity vzorky č.1

Priemerná hodnota porozity z merania č.1 je 60,56 % (Tab.7).

Tab. 7 priemerná hodnota porozity vo vzorke č. 1

názov merania	\bar{x} porozita [%]
1 štrukt. jednotka	60,21
kruh ROI	60,56
polygon. ROI	60,92
Σ	181,69
\bar{x}	60,56
s	0,36
v	0,59

3.1.1.3 Vzorka č.2 – horizontálne umiestnená

Analýza vzorky č. 2 prebehla za rovnakých podmienok a nastaveniach ako u vzorky č. 1. Pre objektivnosť merania bol zvolený rovnaký počet analyzovaných rezov, rovnaké

hodnoty thresholdu aj rozmery všetkých ROI. Vzorka bola vystrihnutá z odlišného miesta materiálu. Na vzorke č.2 sme pozorovali oveľa menšie zošikmenie štruktúrnych jednotiek pleteniny. V tabuľke 8 sú uvedené výsledky z analýzy jednej štruktúrnej jednotky pleteniny.

Tab. 8 výsledky 3D analýzy 1 štruktúrnej jednotky pleteniny (vzorka č.2)

č. merania	počet rezov	otvorená porozita [%]	uzavretá porozita [%]	celková porozita [%]
1	31	69,03	0,13	69,07
2	31	69,32	0,03	69,33
3	31	66,1	0,13	66,15
4	31	64,97	0,07	65
5	31	67,77	0,11	67,8
6	31	66,15	0,16	66,2
7	31	66,21	0,33	66,32
8	31	68	0,14	68,04
9	31	65,87	0,03	65,88
10	31	67,6	0,04	67,62
Σ		671,02	1,17	671,41
\bar{x}		67,10	0,12	67,14
s		1,45	0,09	1,44
v		2,16	76,13	2,15

Priemerná hodnota porozity jednej štruktúrnej jednotky pleteniny je **67,14 %**.

V nasledujúcej tabuľke 9 sú uvedené výsledky merania, kde bola analýza prevedená na 5 odlišne veľkých kruhových ROI.

Tab. 9 výsledky pri kruhovom výbere ROI (vzorka č.2)

č. merania	počet rezov	otvorená porozita [%]	uzavretá porozita [%]	celková porozita [%]
1	31	67,9	0,13	67,94
2	31	67,61	0,12	67,65
3	31	68,01	0,11	68,05
4	31	67,82	0,12	67,86
5	31	68,45	0,13	68,49
Σ		339,79	0,61	339,99
\bar{x}		67,96	0,12	68,00
s		0,31	0,01	0,31
v		0,46	6,86	0,46

Priemerná hodnota celkovej porozity kruhového ROI je **68,00%**.

Výsledky analýzy s polygónovým výberom ROI sú uvedené v tabuľke 10. Priemerná hodnota porozity je v tomto prípade **68,07 %**.

Tab. 10 výsledky z meraní pri polygónovom výbere ROI (vzorka č.2)

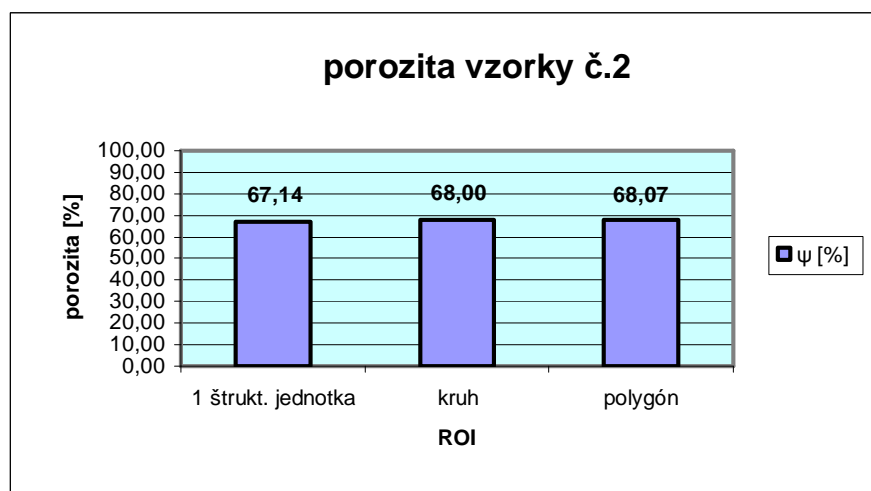
č. merania	počet rezov	otvorená porozita [%]	uzavretá porozita [%]	celková porozita [%]
1	31	68,02	0,13	68,06
2	31	67,8	0,15	67,85
3	31	67,5	0,15	67,55
4	31	68,93	0,11	68,96
5	31	67,88	0,12	67,92
Σ		340,13	0,66	340,34
\bar{x}		68,03	0,13	68,07
s		0,54	0,02	0,53
v		0,79	13,55	0,78

Priemerná hodnota porozity vo vzorke č.2, bola opäť vypočítaná ako aritmetický priemer z troch rôznych prístupov vyznačenia ROI (1 štruktúrna jednotka pleteniny, kruhové ROI a polygónové ROI).

Priemerná hodnota porozity vo vzorke č.2 je 67,74 % vid'. Tab.11 a grafické znázornenie hodnôt porozity v grafe č.2.

Tab. 11 priemerná hodnota porozity vo vzorke č. 2

názov merania	\bar{x} porozita [%]
1 štrukt. jednotka	67,14
kruh ROI	68,00
polygon. ROI	68,07
Σ	203,21
\bar{x}	67,74
s	0,52
v	0,76



graf 2 hodnoty porozity vzorky č.2

3.1.1.4 Vzorka č.3 – horizontálne umiestnená

Tretia vzorka pleteniny bola opäť vystrihnutá z úplne iného miesta rukavice. Celá analýza prebehla za rovnakých podmienok ako meranie vzorky 1 a 2. Na vzorke č.3 sme opäť pozorovali mierne zošíkmenie stĺpikov v pletenine avšak menšie ako pri vzorke č.1. Výsledky z analýzy vzorky č.3 sú uvedené v tabuľkách 12, 13 a 14.

Tab. 12 výsledky 3D analýzy 1 štruktúrnej jednotky pleteniny (vzorka č.3)

č. merania	počet rezov	otvorená porozita [%]	uzavretá porozita [%]	celková porozita [%]
1	31	67,79	0,09	67,82
2	31	66,99	0,21	67,05
3	31	65,61	0,23	65,69
4	31	66,12	0,10	66,16
5	31	65,90	0,19	65,96
6	31	66,39	0,14	66,44
7	31	65,20	0,22	65,28
8	31	65,67	0,10	65,71
9	31	67,22	0,11	67,26
10	31	65,78	0,15	65,83
Σ		662,67	1,55	663,19
\bar{x}		66,27	0,16	66,32
s		0,82	0,06	0,81
v		1,24	35,69	1,23

Priemerná hodnota porozity jednej štruktúrnej jednotky pleteniny je **66,32 %**.

Tab. 13 výsledky pri kruhovom výbere ROI (vzorka č.3)

č. merania	počet rezov	otvorená porozita [%]	uzavretá porozita [%]	celková porozita [%]
1	31	65,16	0,24	65,24
2	31	64,95	0,26	65,05
3	31	65,71	0,13	65,75
4	31	64,00	0,25	64,09
5	31	66,08	0,24	66,16
Σ		325,90	1,13	326,30
\bar{x}		65,18	0,23	65,26
s		0,79	0,05	0,78
v		1,22	24,02	1,20

Priemerná hodnota porozity kruhového ROI je **65,26%**.

Tab. 14 výsledky z meraní pri polygómovom výbere ROI (vzorka č.3)

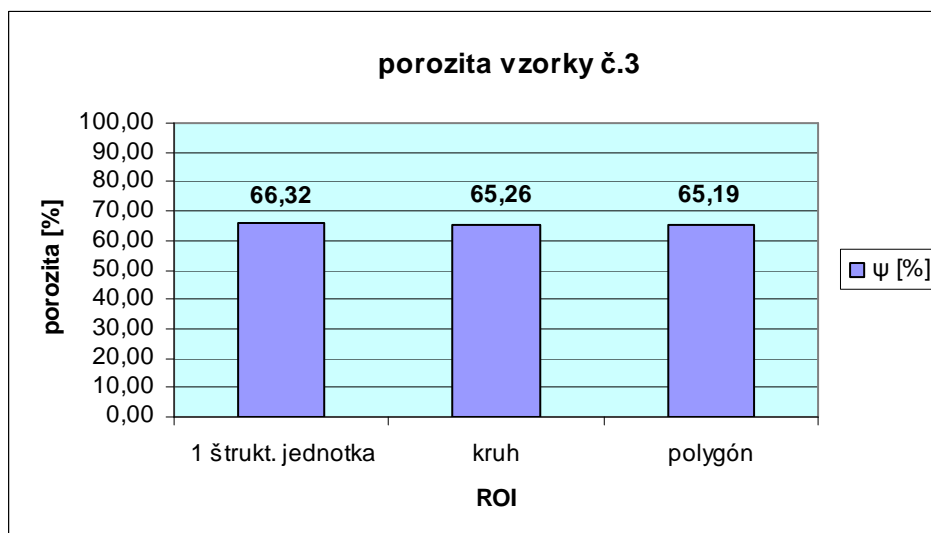
č. merania	počet rezov	otvorená porozita [%]	uzavretá porozita [%]	celková porozita [%]
1	31	64,68	0,21	64,76
2	31	65,03	0,29	65,13
3	31	64,74	0,27	64,84
4	31	65,94	0,19	66,01
5	31	65,11	0,28	65,21
Σ		325,51	1,25	325,95
\bar{x}		65,10	0,25	65,19
s		0,50	0,04	0,50
v		0,78	17,46	0,76

Priemerná hodnota porozity pri polygómovom výbere ROI je **65,19 %**.

V tabuľke 15 je uvedená **priemerná hodnota porozity vzorky č.3 ktorej hodnota je 65,59%**. Grafické znázornenie hodnôt porozity môžeme vidieť v grafe č.3

Tab. 15 priemerná hodnota porozity vo vzorke č. 3

názov merania	\bar{x} porozita [%]
1 štrukt. jednotka	66,32
kruh ROI	65,26
polygon. ROI	65,19
Σ	196,77
\bar{x}	65,59
s	0,63
v	0,97



graf 3 hodnoty porozity vzorky č.3

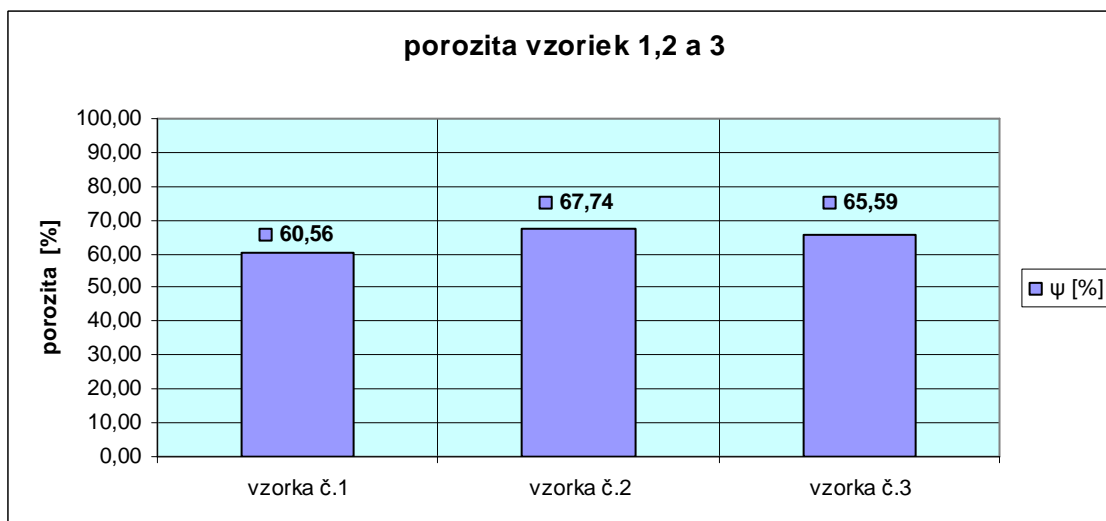
3.1.1.5 Celková porozita materiálu – výsledky z troch vzoriek

Po analýze troch rozličných miest pleteniny sa vyjadrila celková hodnota porozity ako aritmetický priemer z troch výsledných hodnôt porozity (vzorka č 1,2 a 3). Grafické znázornenie hodnôt vidíme v grafe č.4.

Celková porozita skúmaného materiálu má hodnotu 64,63 % vid' Tab.16).

Tab. 16 priemerná hodnota porozity skúmaného materiálu

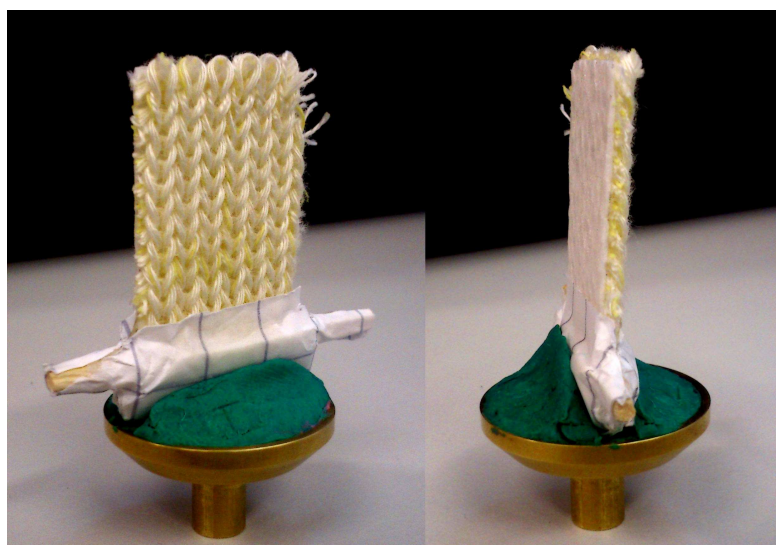
názov merania	\bar{x} porozita [%]
vzorka č.1	60,56
vzorka č.2	67,74
vzorka č.3	65,59
Σ	193,89
\bar{x}	64,63
s	3,69
v	5,70



graf 4 hodnoty porozít pri vzorke č. 1, 2 a 3

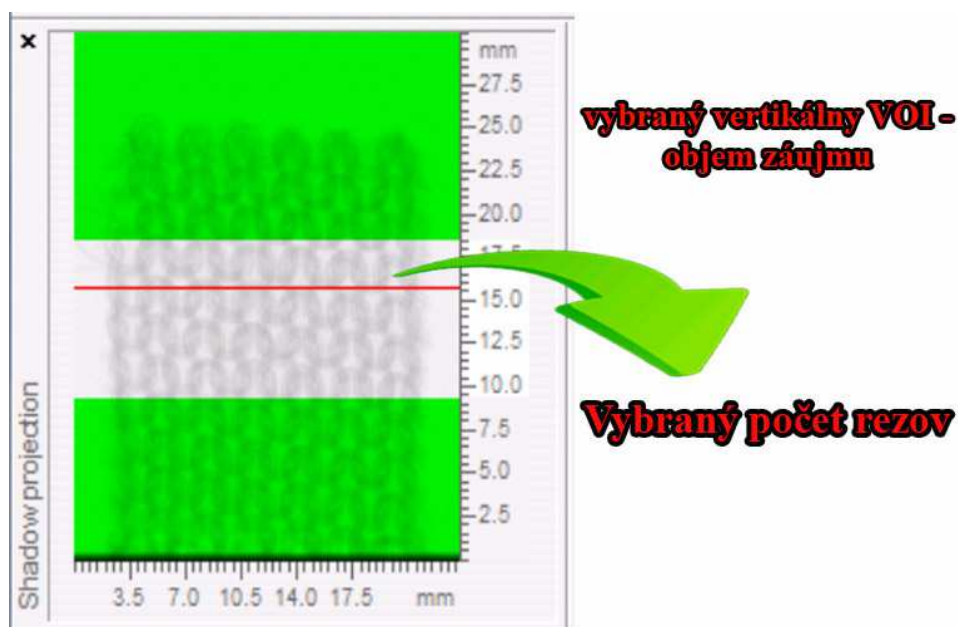
3.1.2 Vertikálne upevnenie textilnej vzorky

Ďalším spôsobom ako previesť scan, bolo upevniť vzorku na veľmi tenkú polystyrénovú platničku, na ktorú sa priesvitnou obojstrannou lepiacou páskou upevnila daná pletenina. Polystyrén bol zvolený práve kvôli tomu, že málo pohlcuje röntgenové žiarenie. Spodná hrana bola spevnená rovnou drevenou doštičkou a takto pripravená vzorka bola vsadená do polystyrénovej podstavy. Následne sa táto vzorka upevnila vertikálne do plastelíny na držiaku (Obr.51). Je nutné dbať na to, aby bola vzorka umiestnená na stred držiaku a tiež kolmo na tento držiak. Polystyrénovú platničku je možné v ďalšom spracovaní scanu bez problémov odfiltrovať, avšak musí byť rovná.



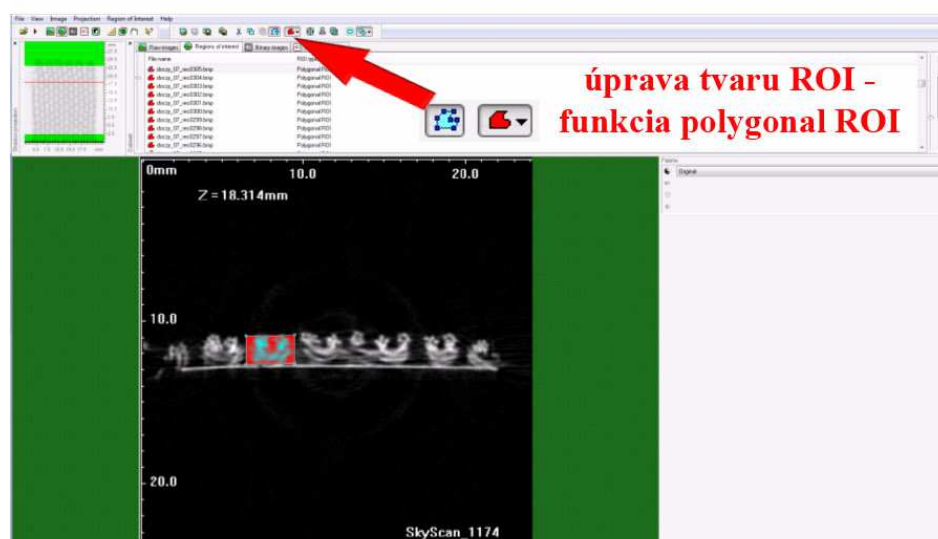
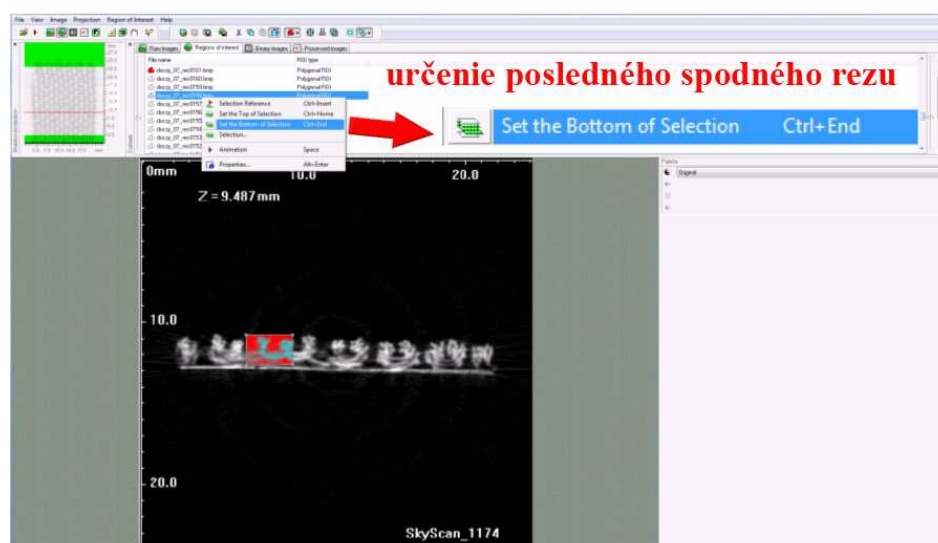
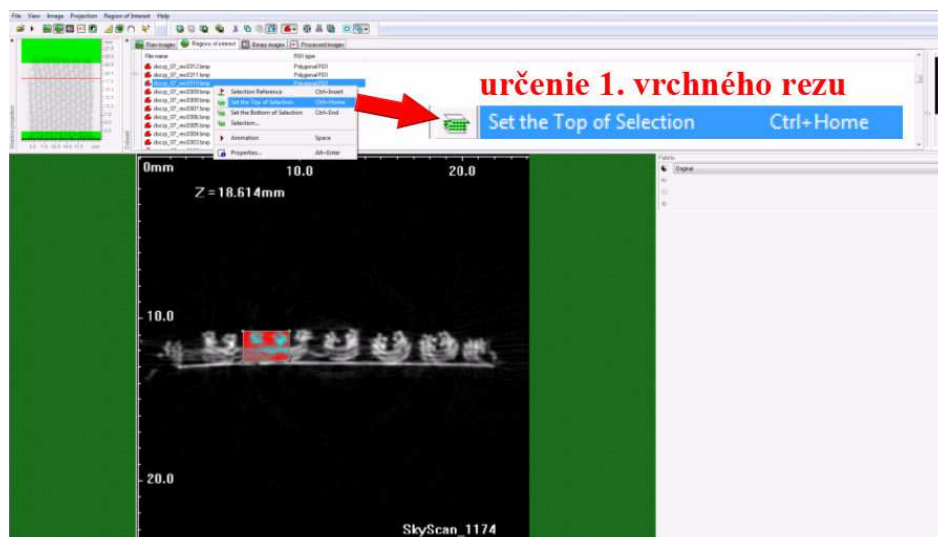
Obr. 51 vertikálne upevnená vzorka pleteniny

Postup scanovania je rovnaký ako v prípade horizontálne umiestnenej vzorky. S rozdielom sa však stretneme pri zobrazení rezov v analyzačnom programe CTan. Pleteninu sledujeme z iného uhla pohľadu aj na tzv. „shadow projection“ kde vyberáme VOI (Obr.52).



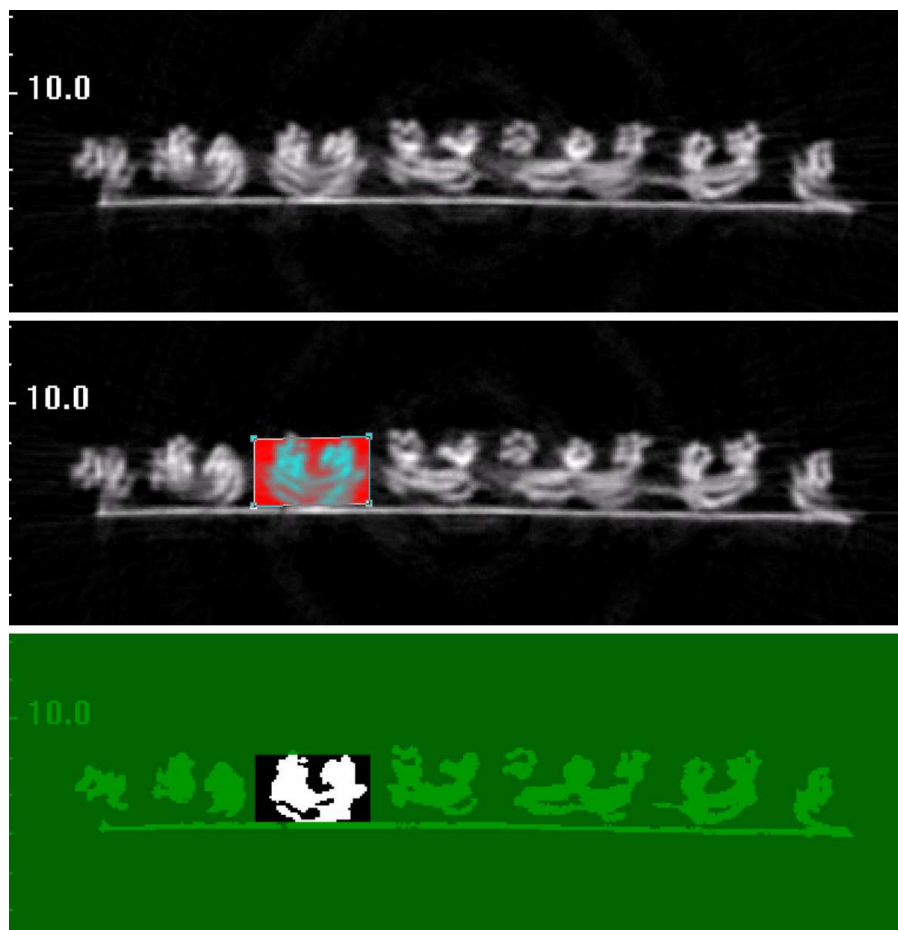
Obr. 52 vybraný vertikálny VOI – objem záujmu (Volume Of Interest)

V tomto postupe merania sme nevyhodnocovali porozitu samostatnej jednej štruktúrnej jednotky pleteniny, ale 1 a 2 stĺpikov pleteniny z 221 rezov pri hodnotách thresholdu totožných s horizontálnym meraním. Na Obr.53 je vyznačený postup výberu prvého a posledného aktívneho rezu a následné vymedzenie jedného stĺpika pleteniny pomocou funkcie *polygonal ROI*.



Obr. 53 postup spracovania obrazov v CTan

V prvom meraní sme analyzovali 1 stĺpik pleteniny a jeho priemerná hodnota porozity je **57,6 %** vid'. Tab 17. Obrázok 54 porovnáva vybranú oblasť ROI v surovom obraze s binárnym.



Obr. 54 vizuálne porovnanie ROI v surovom obraze s obrazom binárnym

Tab. 17 výsledky merania porozity na 1 stĺpiku pleteniny

č. merania	počet rezov	otvorená porozita [%]	uzavretá porozita [%]	celková porozita [%]
1	221,00	56,36	0,18	56,44
2	221,00	53,54	0,28	53,67
3	221,00	57,88	0,48	58,08
4	221,00	55,01	0,69	55,32
5	221,00	58,75	0,36	58,90
6	221,00	63,09	0,28	63,20
Σ		344,63	2,28	345,61
\bar{x}		57,44	0,38	57,60
s		3,35	0,18	3,32
v		5,83	48,28	5,77

V druhom meraní boli analyzované vždy dva susedné stĺpiky pleteniny (Obr.55) a ich priemerná hodnota porozity je **56,01 %** vid' Tab.18.



Obr. 55 výber dvoch stĺpikov pleteniny

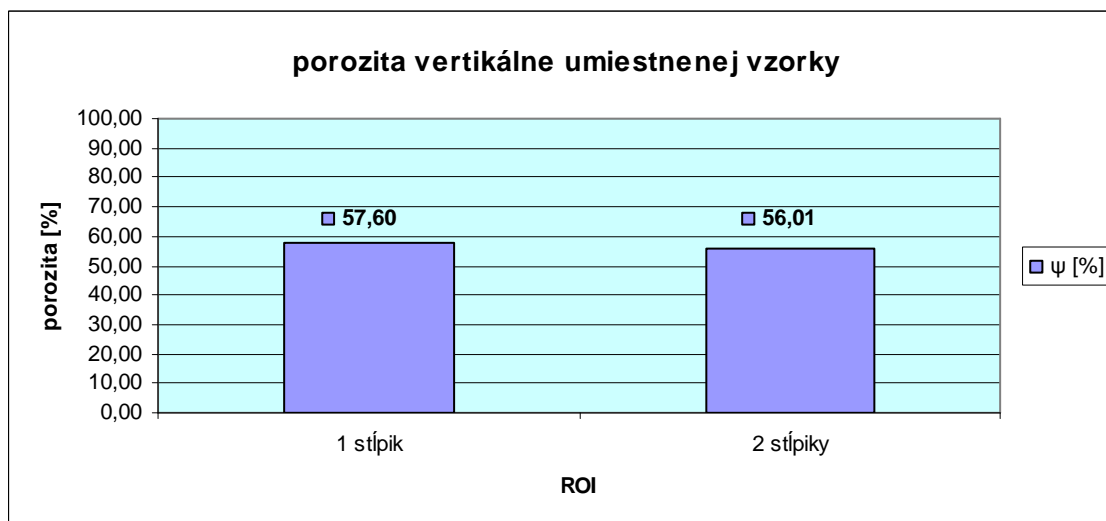
Tab. 18 výsledky merania porozity na 2 stĺpikoch pleteniny

č. merania	počet rezov	otvorená porozita [%]	uzavretá porozita [%]	celková porozita [%]
1	221,00	60,45	0,22	60,54
2	221,00	53,05	0,24	53,16
3	221,00	54,48	0,39	54,66
4	221,00	55,40	0,61	55,67
5	221,00	55,77	0,56	56,02
Σ		279,16	2,02	280,05
\bar{x}		55,83	0,40	56,01
s		2,79	0,18	2,76
v		4,99	44,26	4,93

Priemerná hodnota porozity bola vypočítaná ako priemer z dvoch rôznych prístupov vyznačenia ROI (1 stĺpik a 2 stĺpiky pleteniny). Priemerná hodnota porozity vo vertikálne umiestnenej vzorke je teda **56,81 %** (Tab.19). Grafické porovnanie hodnôt vidíme na grafe 5.

Tab. 19 priemerná hodnota porozity vertikálne umiestnenej vzorky pleteniny

názov merania	\bar{x} porozita [%]
1 stĺpik	57,60
2 stĺpiky	56,01
Σ	113,61
\bar{x}	56,81
s	1,12
v	1,98



graf 5 priemerné hodnoty porozity 1 a 2 stĺpikov pleteniny

3.1.2.1 Nevýhody analýzy vertikálne umiestnenej vzorky

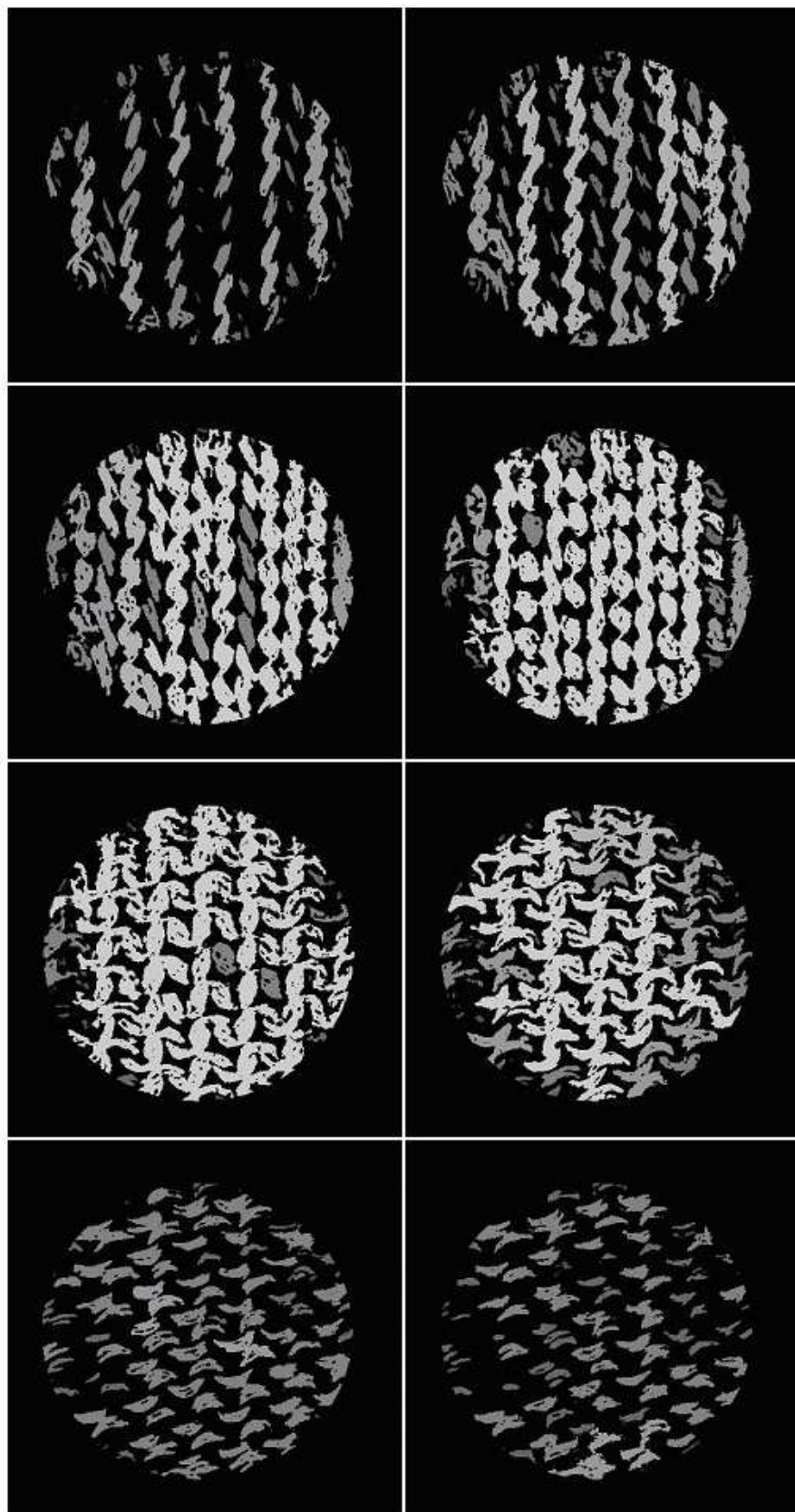
Pri porovnaní výsledkov z horizontálne a vertikálne umiestnenej vzorky vidíme rozdiel o 7,82 %. Táto metóda upevnenia vzorky sa však pre tento materiál neukázala ako vhodná (výsledky boli nepresné), pretože stĺpiky pleteniny boli zošikmené a aj napriek úsiliu, nebola polystyrénová podložka dokonale rovná a úplne kolmo umiestnená do držiaka s plastelínou. Pri analýze potom nebola hodnotená iba pletenina, ale aj malé časti polystyrénu, ktoré výsledok celkovej porozity logicky zmenšovali. Meranie pleteniny v horizontálnom smere sa tým pádom ukázalo pre daný materiál oveľa vhodnejšie. Avšak pokiaľ by bol vylepšený dizajn držiaka vzorky vo vertikálnom smere, analýza by bola rovnako úspešná.

3.2 Význam hodnotenia 3D porozity

Táto kapitola hovorí o potrebe hodnotiť porozitu 3D prístupom a pojednáva o jej výhodách oproti 2D prístupu hodnotenia. Ďalej bude predstavený výstup z CTan v podobe 3D modelu pleteniny uloženého vo formáte stl. ako aj reálny 3D model vyrobený pomocou 3D tlače (rapid prototyping).

3.2.1 2D & 3D porozita

Na Obr.56 je názorne vidieť, prečo je nutné hodnotiť porozitu 3D prístupom. Ilustratívne bolo vybraných 8 rezov pleteniny, kde sledujeme, že v každom mieste resp. reze pleteniny je porozita rôzna. Preto 2D hodnotenie porozity pleteniny napr. pomocou optickej analýzy Nis – Elements predstavuje oproti 3D μ CT menej vhodnú metódu. 3D RTG tomografia nám ďalej umožňuje prácu v ďalších 3D programoch ako napr. CTvox a CTvol, kde je možné pracovať s 3D modelom pleteniny. V prílohe E sú znázornené výstupy z 3D programov CTvox a CTvol. CTvox nám umožnil nahliadnuť do vnútornej štruktúry pleteniny, resp. do jej väzby a CT vol poskytol opäť 3D pohľad na pleteninu, avšak len na jej „povrch“. V oboch programoch je možné vytvárať krátke animácie. Veľmi zaujímavú funkciu ponúka ešte program CTan, kde je možné uložiť vybraný VOI ako 3D model vo formáte stl. Tento formát je využívaný ako vstup v momentálne čoraz obľúbenejšej 3D tlači (RP).

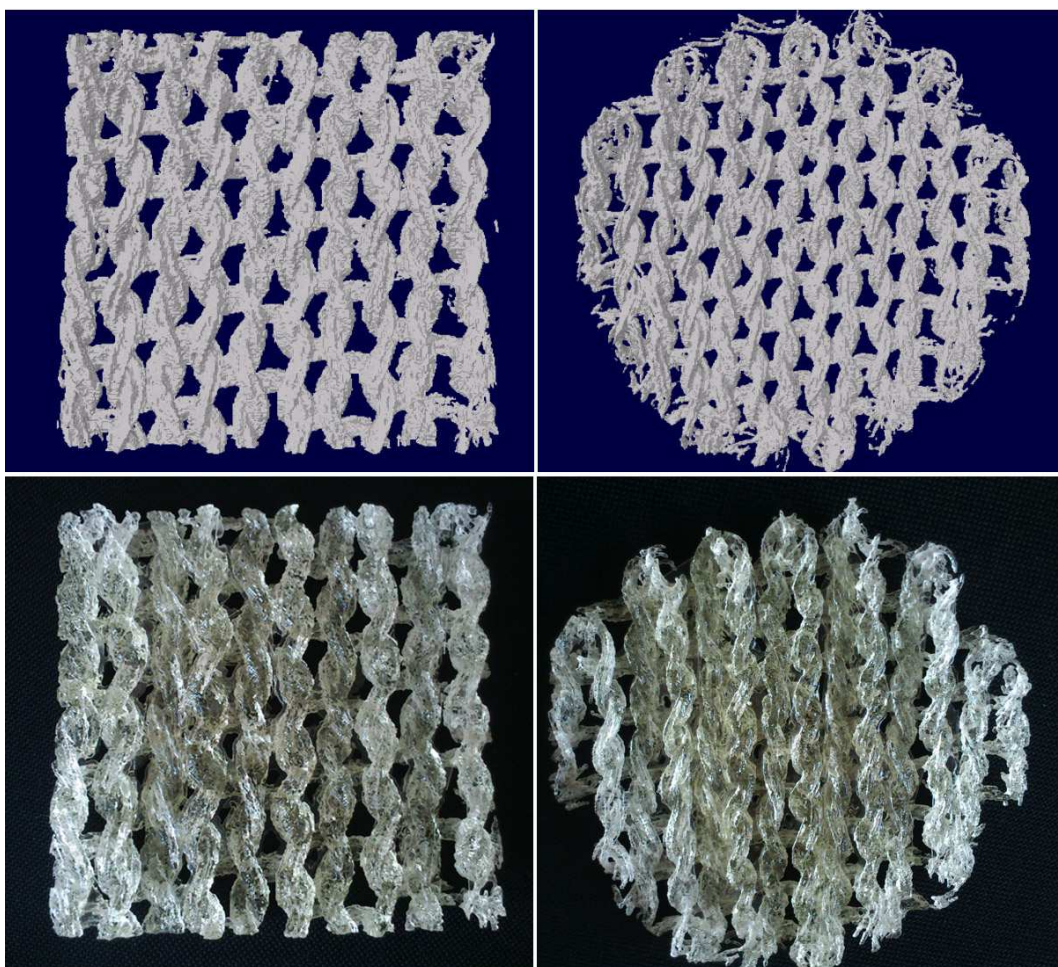


Obr. 56 8 rôznych rezov pleteniny – sledujeme rôznu 2D porozitu

3.2.2 Výstup z μ CT do RP

V programe CTan je možné vytvoriť 3D model, ktorý sa ukladá v troch rôznych formátoch a to .ctm, .p3g a .stl. Tieto formáty zaznamenávajú priestorovú informáciu o nasnímanom objekte. Takto uložené 3D modely je potom možné otvoriť napr. v programe CTvol alebo formát .stl v programoch pre 3D tlač – stereolitografiu. 3D modely uložené v týchto formátoch je možné následne ďalej spracovávať v rôznych programoch určených buď na dodatočnú úpravu vzhľadu, alebo na matematickú analýzu.

Vďaka formátu .stl boli pomocou 3D tlače (rapid prototyping) vytlačené dva modely pleteniny, ktoré boli zväčšené v mierke 7:1 a 5:1. Modely boli vyrobené z transparentného fotopolyméru s obchodným názvom VeroClear. Výstup do stl. bol prevedený z horizontálne upevnenej vzorky. Na Obr.57 vidíme dva 3D modely uložené vo formáte .stl, otvorené v programe CTvox a ich reálnu podobu - výstup z 3D tlače.



Obr. 57 3D modely uložené vo formáte .stl a zobrazené v programe CTvox a následný výstup pomocou rapid prototyping

3.3 Teoretický výpočet porozity pleteniny

V tejto kapitole bude pomocou výpočtov stanovená porozita pletenín, vyjadrená cez objemové zaplnenie textilného vlákenného útvaru.

V nasledujúcej časti tejto práce sú uvedené hodnoty hlavných štruktúrnych parametrov pleteniny zistené priamo meraním, alebo výpočtom z teoretických vzťahov. V tejto časti sa nachádzajú aj potrebné čiastkové výpočty nutné k vyjadreniu zaplnenia a porozity pleteniny ako aj samotný výpočet porozity pleteniny.

3.3.1 Parametre pleteniny

Aby sme sa dopracovali k výslednej hodnote porozity pleteniny, potrebujeme poznať niekoľko údajov ako napr. hrúbku pleteniny, rozteč riadkov a stĺpikov, počet stĺpikov a riadkov na 1 cm, resp. rozmery základnej štruktúrnej jednotky pleteniny, ďalej efektívny priemer priadze a dĺžku očka. Taktiež pre lepšiu predstavu o pletenine budú uvedené výpočty plošnej hmotnosti pleteniny, alebo plošné zakrytie pleteniny.

3.3.1.1 Plošná hmotnosť

Definícia plošnej hmotnosti hovorí, že je to hmotnosť známej plochy plošnej textílie, vzťahnutá k tejto ploche, vyjadrená v gramoch na meter štvorcový. Meranie prebiehalo podľa normy ČSN EN 12127 (80 0849) [37].

Na vzorkách s rozmermi 10 x 10 cm bola premeraná plošná hmotnosť pomocou analytických váh, viď príloha F (Tab.23). Následne sa stanovil aritmetický priemer z 10 meraní v $[g/cm^2]$ pri vzorke s plochou $S=100cm^2$ a výsledok bol prepočítaný na hmotnosť pleteniny s plochou $S=1m^2$ (Tab.20) podľa vzt'ahu (14).

Tab. 20 priemerná hodnota plošnej hmotnosti skúmanej pleteniny

Rozmery vzorky	priemerná hmotnosť [g]
vzorka 10x10 [cm]	4,1457
vzorka 100x100 [cm]	414,57

$$M = \frac{m \cdot 10000}{A} [g / m^2] \quad (14)$$

Kde:

M [g/m²] ... plošná hmotnosť

m [g] ... hmotnosť skúšobnej vzorky v klimatizovanom alebo suchom stave

A [cm²] ... plocha rovnakej skúšobnej vzorky

Plošná hmotnosť testovanej pleteniny:

$$M = 414,57 \text{ [g/m}^2\text{]}$$

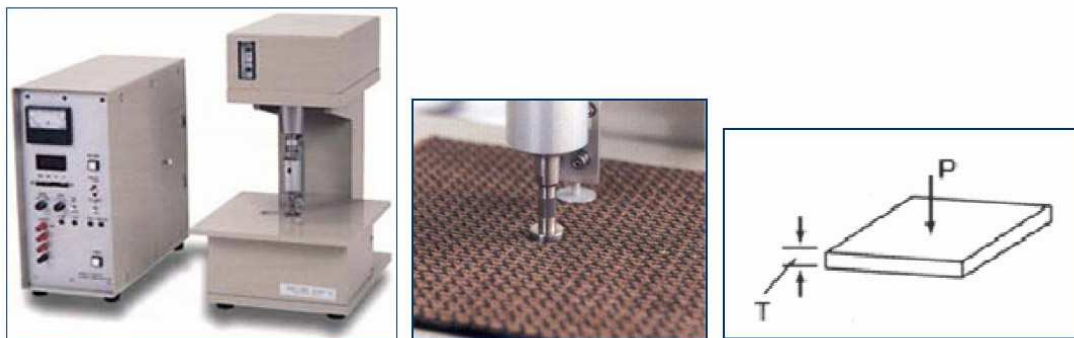
3.3.1.2 Hrúbka pleteniny

Pri stanovovaní hrúbky pleteniny bolo dôležité zvoliť metódu, pri ktorej dochádza k minimálnej deformácii pleteniny tlakom, preto bolo meranie uskutočnené na systéme KES (Kawabata Evaluation System) vid'. Obr 58. Vzorka testovanej pleteniny bola stláčaná čelusťou s plochou 2 cm² a v našom prípade silou 49N/m² čo predstavuje tzv. minimálnu silu namáhania, pri ktorej dostaneme najreálnejšiu hrúbku pleteniny T_0 [mm]. Ide o tzv. 1. fázu, kedy dochádza k identifikácii prvého kontaktu s meraným materiálom a čelusťou [38].

Princípom meranie je vlastne odozva plošnej textílie na pôsobenie tlakovej sily. Medza namáhania resp. maximálny tlak $P_m = 4900 \text{ N/m}^2$, avšak túto hodnotu sme nepoužili práve kvôli značnej deformácii pleteniny pri týchto podmienkach. Zmerali sme 3 hodnoty hrúbky v smere stĺpikov a 3 v smere riadkov, následne bola z týchto hodnôt vypočítaná priemerná hrúbka pleteniny T_0 .

Hrúbka textílie je definovaná ako kolmá vzdialenosť medzi dvoma definovanými doskami, pričom na textíliu pôsobí určitý prítlak. Namerané hodnoty sú uvedené v Tab.24 - príloha F.

Priemerná hrúbka skúmanej pleteniny pomocou KES systému je 3,065 [mm].



Obr. 58 jeden z prístrojov systému KES – meranie hrúbky plošnej textílie [38]

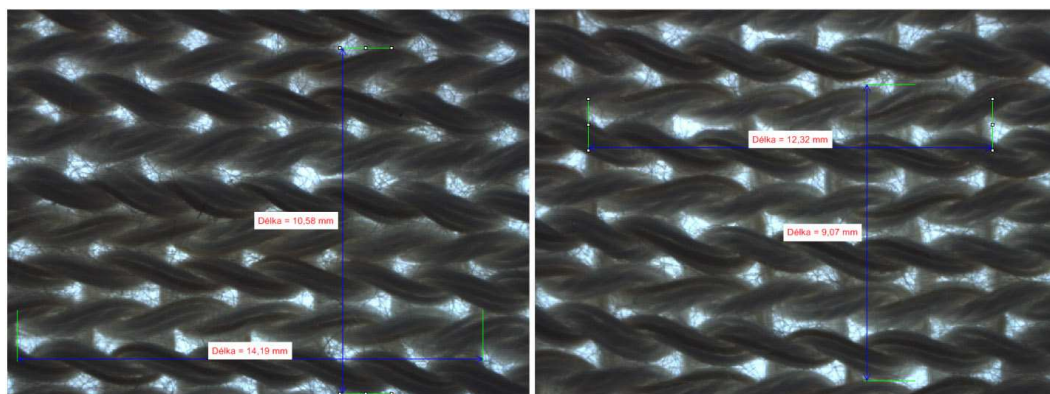
3.3.1.3 Rozteč riadkov a stĺpikov (a, b)

Rozteč riadkov a stĺpikov resp. hodnoty a , b vid' obr. (33), je možné vyjadriť podľa vzťahu (1) a (2).

Kvôli väčšej presnosti merania, boli rozmery štruktúrnej jednotky pleteniny zmerané aj priamo pomocou obrazovej analýzy Nis – Elements a následne porovnané. Problémom totiž je variabilita väzieb pleteniny, ktorá vedie k veľkým rozdielom v štruktúre [32].

3.3.1.4 Počet stĺpikov a riadkov na 1 cm

Pomocou obrazovej analýzy Nis – Elements bola nasnímaná pletenina a následne použitá funkcia merania dĺžky (Obr.59). Spočítalo sa niekoľko súvislo na seba nadväzujúcich riadkov a stĺpikov a zmeralo sa na ako dlhom úseku sa nachádzajú. Následne sa prepočítal počet riadkov a stĺpikov na dĺžku 1 cm. Z týchto údajov bola vyjadrená rozteč riadkov (vzťah 15), stĺpikov (vzťah 16) a na koniec obsah 1 základnej štruktúrnej jednotky pleteniny (vzťah 17).



Obr. 59 rozteč stĺpikov a riadkov meraná na rôznych úsekoch pleteniny pomocou Nis – Elements

Tabuľka 25 s nameranými hodnotami počtu riadkov a stĺpikov na 1cm je uvedená v prílohe F.

Výsledná hustota riadkov a stĺpikov pleteniny na 1 cm: $H_r = 4,127 / \text{cm}$
 $H_s = 3,488 / \text{cm}$

rozteč riadkov:

$$a_1 = \frac{1}{H_r} \quad (15)$$

$$a_1 = \frac{1}{4,127}$$

$$a_1 = 0,2423 \text{ [cm]}$$

rozteč stĺpikov:

$$b_1 = \frac{1}{H_s} \quad (16)$$

$$b_1 = \frac{1}{3,488}$$

$$b_1 = 0,2867 \text{ [cm]}$$

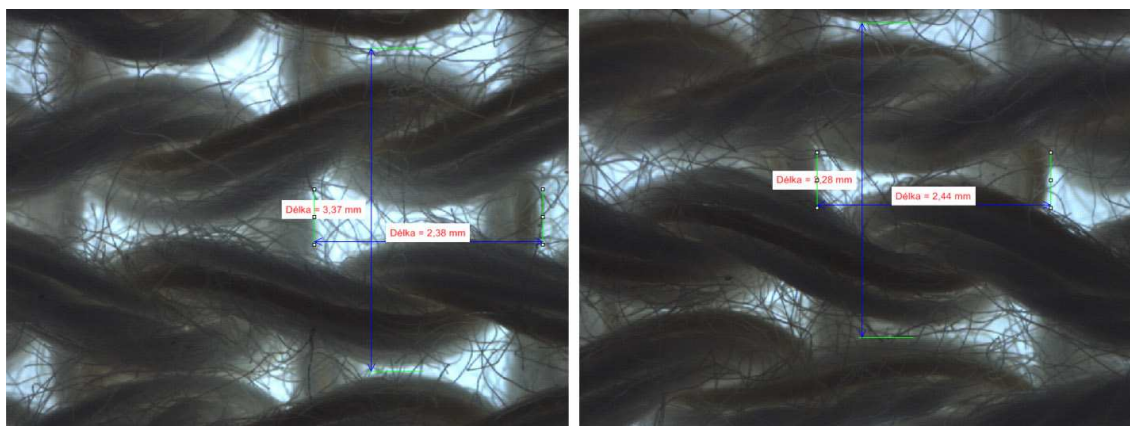
Obsah základnej štruktúrnej jednotky pleteniny:

$$S_1 = a_1 \cdot b_1 \quad (17)$$

$$S_1 = 0,0695 \text{ [cm}^2\text{]}$$

3.3.1.5 Rozmery 1 základnej štruktúrnej jednotky pleteniny zistené pomocou obrazovej analýzy

Pomocou obrazovej analýzy sa zmeralo 10 základných štruktúrnych jednotiek pleteniny (Obr.60) a zo získaných hodnôt bol vypočítaný aritmetický priemer šírky riadku a stĺpika pleteniny. Následne sa vypočítala plocha 1 základnej štruktúrnej jednotky pleteniny.



Obr. 60 rozmery 1 štruktúrnej jednotky pleteniny (Nis – Elements)

Tabuľka s nameranými hodnotami rozmerov 1 základnej štruktúrnej jednotky pleteniny je uvedená v prílohe F (Tab. 26).

Priemerná šírka stĺpika (b_2) v jednej štruktúrnej jednotky pleteniny je 2,986 [mm] a šírka riadku (a_2) má hodnotu 2,381 [mm].

Obsah základnej štruktúrnej jednotky pleteniny bol vypočítaný podľa vzťahu 18:

$$S_2 = a_2 \cdot b_2 \quad (18)$$

$$S_2 = 0,2381 \cdot 0,2986$$

$$S_2 = 0,0711 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Sledujeme, že hodnoty rozmerov štruktúrnej jednotky pleteniny z dvoch rôznych prístupov sa mierne líšia a to konkrétne pri a_1 a a_2 o 1,73 %, pri b_1 a b_2 o 3,99 % resp. pri S_1 a S_2 o 2,25 %. Preto bol kvôli objektívnejšiemu výsledku vyhodnotený priemer výsledných hodnôt z týchto dvoch rôznych prístupov zisťovania rozmerov.

Priemerná hodnota rozmeru a a b je vypočítaná podľa vzťahov 19 a 20.

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (19)$$

$$a = \frac{0,2423 + 0,2381}{2}$$

$$a = 0,2402 \text{ [cm]}$$

$$b = \frac{b_1 + b_2}{2} \quad (20)$$

$$b = \frac{0,2867 + 0,2986}{2}$$

$$b = 0,29265 \text{ [cm]}$$

Obsah základnej štruktúrnej jednotky pleteniny (vzt'ah 21):

$$S = a \cdot b \quad (21)$$

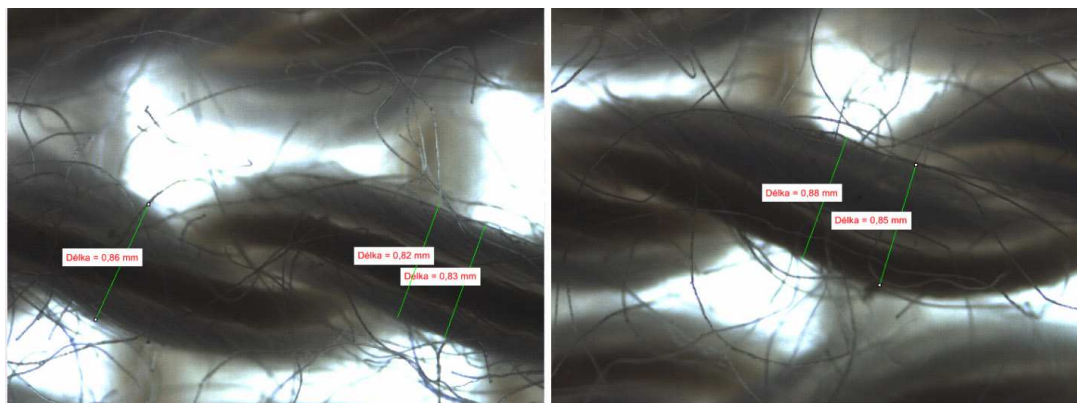
$$S = 0,0703 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Celkový priemerný obsah 1 základnej štruktúrnej jednotky pleteniny je 0,0703 [cm²].

3.3.1.6 Efektívny priemer priadze

Efektívny priemer priadze bol zmeraný pomocou obrazovej analýzy Nis – Elements (Obr.61). Bolo prevedených 21 meraní. Hodnoty meraní efektívneho priemeru priadze sú uvedené v prílohe F (Tab.27).

Výsledná priemerná hodnota ef. priemeru priadze je $d = 0,8419 \text{ [mm]}$.



Obr. 61 meranie efektívneho priemeru priadze na obrazovej analýze

Avšak ako uvádza Kovář [32], už samotná definícia pojmu „priemer nite“ resp. priadze je zložitá a práve určenie hodnoty priemeru je veľmi problematické. Tento parameter môže spôsobiť v nasledujúcich výpočtoch nepresnosti, čo spôsobuje problémy pri popise „plnosti“ štruktúry (zakrytia a zaplnenia). Ďalším problémom môže byť nastavenie osvetlenia pri meraní, ktoré tiež ovplyvňuje výsledné hodnoty.

3.3.1.7 Dĺžka očka

Dĺžka očka v jednej základnej štruktúrnej jednotke pleteniny patrí k veľmi dôležitým charakteristikám pleteniny. Hodnoty dĺžky očka pleteniny boli merané na obrazovej analýze Nis – Elements (Obr.62) a taktiež vypočítané podľa teoretického vzťahu (22).

Vyjadrenie dĺžky očka podľa Peirce [39]:

$$l = \frac{2}{c} + \frac{1}{w} + 5,94d \quad (22)$$

$$l = \frac{2}{4,127} + \frac{1}{3,488} + 5,94 \cdot 0,08419$$

$$l = 1,2714 \text{ [cm]}$$

Kde:

l ... dĺžka priadze jedného očka [cm]

c ... počet riadkov na 1 cm

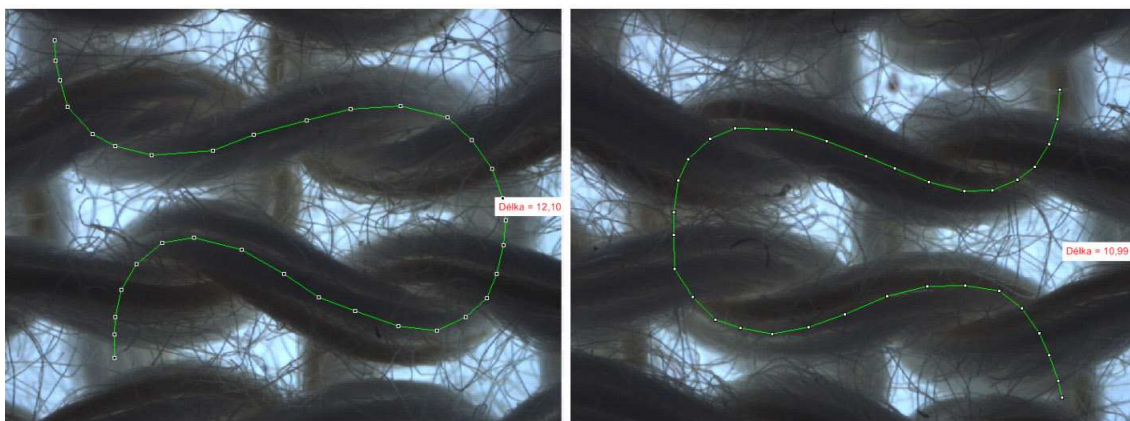
w ... počet stĺpikov na 1 cm

d ... priemer priadze [cm]

Dĺžka očka vypočítaná z teoretického vzťahu má hodnotu 1,2714 [cm]

Ďalším spôsobom ako zistiť dĺžku očka bolo experimentálne zmeranie tejto dĺžky v programe obrazovej analýzy Nis - Elements. Previedlo sa 10 meraní (tabuľka s nameranými hodnotami je uvedená v prílohe F – Tab.28).

Priemerná hodnota dĺžky jedného očka pleteniny zmeraná experimentálne je 1,1368 [cm].



Obr. 62 meranie dĺžky jedného oka pleteniny pomocou Nis - Elements

Teoreticky vypočítaná dĺžka oka sa líši od experimentálne nameranej hodnoty až o 10,6 %, čo by pri použití teoreticky vypočítanej dĺžky oka spôsobovalo v nasledujúcich výpočtoch zakrytia pleteniny nelogické výsledky. Taktiež priemer týchto dvoch hodnôt bol príliš vysoký a okrem toho, dĺžku oka s rozmermi okolo 1,27 cm sme prakticky nenamerali ani v jednom prípade. Keďže teoretické modely rátajú s dokonalou symetriou, čo v skutočnosti nie je reálne, v ďalších výpočtoch sa počítalo s hodnotou získanou pomocou obrazovej analýzy Nis – Elements ($l=1,1368$ [cm])

3.3.1.8 Plošné zakrytie pleteniny

Pod pojmom zakrytie pleteniny rozumieme zaplnenie plošného priestoru spleteného do pletárskej väzby.

Na vyjadrenie zakrytia pleteniny je nutné poznať niekoľko údajov a to rozteč riadkov a , rozteč stĺpikov b , dĺžku oka l v jednej štruktúrnej jednotke pleteniny a efektívny priemer nite d . Plochu štruktúrnej jednotky pleteniny sme si vyjadrili ako súčin $a \cdot b$. Pokiaľ by sme zanedbali vplyv prekríženia nití (4x) na zakrytú plochu, potom sa plocha zakrytá niťou bude rovnať súčinu ld , avšak týmto spôsobom by sme si zanášali pomerne veľkú chybu do výpočtu. Preto bol na výpočet zakrytia pleteniny použitý vzťah (23) [32].

Obsah základnej štruktúrnej jednotky pleteniny:

$$S = 0,0703 \text{ [cm}^2\text{]}$$

plošné zakrytie pleteniny:

$$Z = \frac{d \cdot l - 4d^2}{a \cdot b} \quad (23)$$

$$Z = \frac{d \cdot l - 4d^2}{S}$$

$$Z = \frac{(0,08419 \cdot 1,1368) - 0,028352}{0,0703}$$

$$Z = 0,958$$

Plošné zakrytie pleteniny Z je 95,8 %.

3.3.2 Zisťovanie porozity pomocou obrazovej analýzy

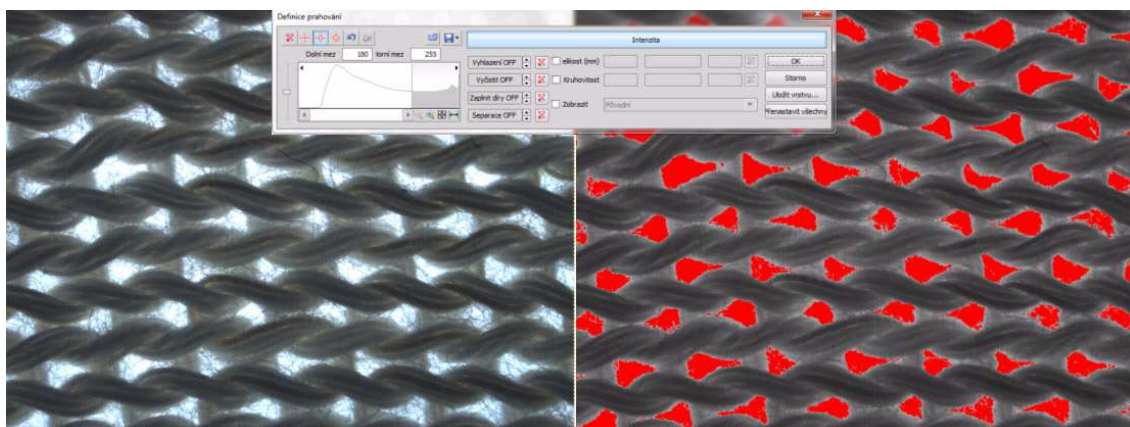
Porozita hodnotená pomocou obrazovej analýzy je definovaná ako priepustnosť viditeľného svetla cez skúmanú textíliu [%] [40].

Princíp merania:

Porozitu predstavujú „medzery“ medzi priadzami v textílii. Svetlo prestupujúce cez medzery resp. póry pleteniny je zaznamenávané a prevedené na biele pixely, kým priadza ktorá zabraňuje prestupu svetla je prevedená na čierne pixely [40].

Porozita pleteniny udáva podiel vzduchu v pletenine a označuje sa písmenom P. Táto veličina patrí do kategórie bezrozmerných čísel a je možné ju udávať v hodnotách od 0 do 1, resp. od 0 do 100 (v percentách).

Pred samotným meraním je dôležité skalibrovať prístroj. Veľmi dôležitým parametrom, avšak pomerne subjektívne nastaviteľným, je hodnota thresholdu (Obr.63), kde určujeme, ktoré pixely budú považované za biele a ktoré už za čierne. Práve pri tomto nastavení môžu vzniknúť odchýlky od teoreticky vypočítanej hodnoty.



Obr. 63 určovanie hodnoty thresholdu

Pre výpočet hodnoty porozity pomocou obrazovej analýzy Nis-Elements bola najskôr zistená plocha pórov, resp. plocha otvorov medzi väzbovými bodmi v pletenine a celková nasnímaná plocha. Jedným z najjednoduchších spôsobov stanovenia tejto porozity je jej výpočet cez zakrytie pleteniny, resp. z plošného zakrytia Z [33] (vypočítaním doplnku) vid' vzťah (24). Avšak je nutné mať na pamäti, že meraním získame len percentuálne vyjadrenie zakrytého a nezakrytého povrchu v jednom uhle pohľadu, a nie reálnu „3D porozitu“. Pretože póry v pletenine predstavujú „3D objekt“ je nutné pristupovať k tomuto faktoru aj z hľadiska meracích zariadení.

$$\psi = 1 - Z \quad (24)$$

Výsledná hodnota porozity p_o je 9,769 %.

Zakrytie pleteniny Z možno vypočítať z vzťahu (25) :

$$Z = 100 - p_o \quad (25)$$

$$Z = 100 - 9,769$$

$$Z = 90,231\%$$

Hodnoty plošnej porozity zistenej pomocou obrazovej analýzy pomerne výrazne kolísali, nakoľko merania boli prevedené na rôznych miestach pleteniny a ako už bolo spomenuté, štruktúra pleteniny je veľmi variabilná a pohyblivá. Variačný koeficient plošnej porozity má hodnotu 16,403 %. Namerané hodnoty skúmanej porozity sú uvedené v Tab. 29 – príloha F.

Sledujeme, že výsledky plošného zakrytia pleteniny vypočítaného teoreticky a zmeraného pomocou obrazovej analýzy sa líši o 5,8 %. Avšak tento údaj nám stále nič nehovorí o objeme pleteniny, pretože nie je totožný so zaplnením μ (z 2D obrazu nie je možné zistiť skutočnú 3D porozitu).

3.3.3 Výpočet zaplnenia a porozity pleteniny

Keďže skúmaná pletenina predstavuje 3D objekt, pri výpočte zaplnenia a porozity sa vychádzalo z vyššie spomínanej „objemovej definície zaplnenia μ , kde zaplnenie predstavuje podiel objemu vlákien k celkovému objemu vlákenného útvaru. Textilný vlákenný útvar v tomto prípade predstavuje 1 štruktúrna jednotka pleteniny, ktorú si môžeme definovať ako kváder s rozmermi $a \cdot b \cdot T_0$.

Kde:

a ... rozteč riadkov [cm]

b ... rozteč stĺpikov [cm]

T_0 ... hrúbka pleteniny [cm]

Tieto údaje sú známe, preto môže byť celkový objem textilného vlákenného útvaru vyjadrený nasledovne (vzťah 26):

$$V_c = a \cdot b \cdot T_0 \quad (26)$$

$$V_c = 0,2402 \cdot 0,29265 \cdot 0,3065 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$V_c = 0,02155 \text{ [cm}^3\text{]}$$

Objem vlákien, resp. priadze V v tomto vlákennom útware vyjadríme ako súčin dĺžky nite l v 1 očku a jej plošného prierezu S_p (vzťah 27).

$$V = \frac{l \cdot \pi d^2}{4} \quad (27)$$

$$V = \frac{1,1368 \cdot 3,14 \cdot 0,007088}{4}$$

$$V = 0,00633 \text{ [cm}^3\text{]}$$

Kde:

l ... dĺžka 1 očka [cm]

d ... efektívny priemer priadze [cm]

Potom vyjadríme zaplnenie vlákenného útvaru ako pomer V a V_c (vzťah 28):

$$\mu = \frac{V}{V_c} \quad (28)$$

$$\mu = \frac{0,00633}{0,02155}$$

$$\mu = 0,29374$$

Kde:

V ... objem priadze

V_c ... celkový objem

Pričom platí $V \leq V_c$ a $\mu \in \langle 0,1 \rangle$

Porozitu pleteniny ψ_p následne vyjadríme podľa vzťahu (29):

$$\psi_p = 1 - \frac{V_{priadze}}{V_{celkový}} \quad (29)$$

$$\psi_p = 1 - \mu$$

$$\psi_p = 1 - 0,29374$$

$$\psi_p = 0,706$$

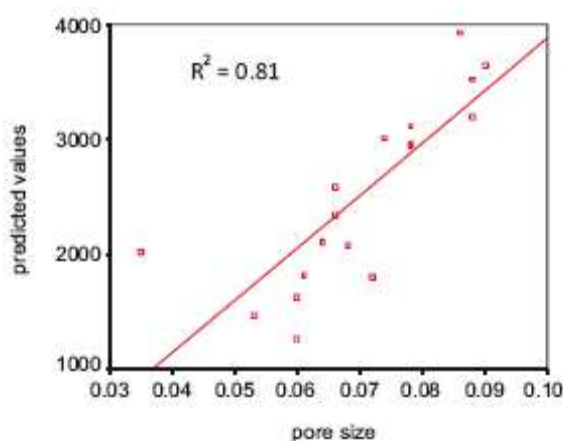
Objem vzduchu v pletenine predstavuje 70,6 %.

3.4 Vzťah porozity & priepustnosti vzduchu v pleteninách

Priedušnosť textílií je definovaná ako množstvo vzduchu, ktoré prejde materiálom za jednotku času a pri stanovenom tlaku. Zo samotnej štruktúry pletení vyplýva, že majú oveľa viac pórov, ako tkaniny, a preto vo všeobecnosti platí, že priedušnosť pletení je vyššia ako priedušnosť tkanín o rovnakej hmotnosti. Je veľmi dôležité vykonávať skúšky priepustnosti vzduchu, pretože definuje vlastnosti hrejivosti, ochrany proti vetru, „dýchateľnosť“ pleteného odevného materiálu. Priedušnosť vzduchu predstavuje

dôležitý faktor ovplyvňujúci komfort, pretože sa podieľa na transporte vlhkosti od tela do okolitého prostredia. Odvod vlhkosti od tela (v prípade oblečeného organizmu) prebieha niekoľkými spôsobmi a to konkrétne kapilárnym, migračným, difúznym a sorpčným spôsobom. Práve difúzny odvod vlhkosti sa uskutočňuje prostredníctvom pórov v pletenine, ktoré sa svojou veľkosťou a „krivolakosťou“ zúčastňujú na kapilárnom odvode.

Porozita pletenín ovplyvňuje fyzikálne vlastnosti ako napríklad objemovú hmotnosť, absorpciu vlhkosti, tepelnú vodivosť a iné. Priedušnosť textílií je prevažne ovplyvnená charakteristikou pórov v textílii. Je teda pomerne jasné, že veľkosť pórov a ich rozloženie sú funkciou geometrie textílie. Priemer priadze, povrchové úpravy a počet stĺpikov a riadkov pripadajúcich na jednotku dĺžky predstavujú hlavné faktory ovplyvňujúce porozitu textílie. Porozita textílie je následne prepojená s veľmi dôležitými vlastnosťami ako je priepustnosť vzduchu, vody, vlastnosti vyfarbenia a iné. Priedušnosť a porozita sú veľmi úzko prepojené. Ak má textília veľmi vysokú porozitu, môžeme ju považovať za priepustnú. V príspevku [35] bol vytvorený teoretický model na predikciu hodnôt priedušnosti pre pleteniny z ktorého vyplýva, že medzi veľkosťou pórov a priedušnosťou existuje tesný lineárny vzťah vid'. Obr.64.



Obr. 64 vzťah medzi predikovanou priedušnosťou a veľkosťou pórov [35]

Podľa [35] z experimentálnych výsledkov vyplýva, že pletenina s najnižším počtom riadkov na cm a najnižšou hodnotou jemnosti v [tex] dosahuje najvyššiu hodnotu priedušnosti vzduchu. Navyše so stúpajúcou dĺžkou očka sa vytvára aj voľnejšia štruktúra pleteniny a tým pádom sa zvyšuje aj priedušnosť. Čím je priadza tenšia a póry medzi očkami pleteniny sú väčšie, tým sa taktiež priedušnosť zvyšuje. Ako ďalej

uvádza [35], veľkosť pórov sa naopak znižuje s rastúcou hustotou riadkov a stĺpikov na cm a so zvyšujúcim sa priemerom priadze. Avšak je nutné mať na pamäti, že skutočná geometria pleteniny sa od ideálneho modelu pleteniny takmer vždy odlišuje, a preto aj porozitu a priedušnosť modelované pomocou rôznych teoretických vzťahov nie je možné považovať za 100% presné.

Hodnota prietoku vzduchu cez našu vzorku pleteniny bola zmeraná na prístroji FX3300, kde bola meraná plocha s priemerom 20 cm^2 . Na tejto ploche sa nachádza v priemere 300 základných štruktúrnych jednotiek pleteniny.

Priemerná hodnota prietoku vzduchu z 30 meraní cez plochu 20 cm^2 je $2,5183\text{ [dm}^3/\text{s}]$ vid'. príloha F, Tab.30.

Ďalším predmetom výskumu by mohol byť experiment s rôznymi druhmi pletení, pri ktorých by bola analyzovaná porozita pomocou μCT a následne testovaná priedušnosť vzduchu cez dané pleteniny. Tieto dve vlastnosti dané do vzájomného vzťahu by ukazovali mieru ich závislosti.

4. Diskusia výsledkov

V nasledujúcej kapitole sú opísané všetky získané hodnoty meraní a výsledky z teoretických výpočtov a z μCT 3D analýzy.

Teoretické výpočty

Na to aby mohla byť vyjadrená porozita pleteniny, resp. jej zaplnenie, boli uskutočnené nasledovné merania:

Meranie hrúbky pleteniny na systéme KES, ďalej pomocou obrazovej analýzy Nis – Elements bolo zistených niekoľko dôležitých údajov ako je počet stĺpikov a riadkov na 1 cm , rozmery 1 štruktúrnej jednotky pleteniny, efektívny priemer priadze, dĺžka očka a plošná porozita pleteniny.

Následne sme z týchto hodnôt vyjadrili celkový objem textilného vlákenného útvaru, ktorý predstavoval 1 štruktúrnu jednotku pleteniny, a objem priadze v tejto jednotke. Z týchto údajov bolo vypočítané zaplnenie, ktoré má hodnotu $\mu = 0,29374$. Porozita pleteniny bola vypočítaná ako $\psi_p = 1 - \mu$ čo predstavuje výslednú hodnotu porozity $70,6\%$.

μCT 3D analýza

Meranie v horizontálnom smere prebehlo celkovo na 3 vzorkách vystrihnutých z odlišných miest pleteniny. Pri každej vzorke boli skúmané tri druhy výberu ROI (oblasti záujmu) a to konkrétne 1 štruktúrna jednotka pleteniny (10 meraní), kruhové ROI (5 meraní) a ROI vytvorené funkciou Polygonal (5 meraní). Každá vzorka bola vyhodnocovaná pri rovnakých podmienkach. Podmienkami sa myslí rovnaký počet vybraných rezov (31) určených na analýzu, a rovnaké hodnoty Thresholdu [spodný threshold (low) = 112, vrchný threshold (upper) = 250].

Vzorka č.1, ktorá bola umiestnená na nástavci v horizontálnom smere, vykazuje priemernú porozitu 60,56 %. Z výsledkov môžeme povedať, že porozita zistená z troch rôznych prístupov ROI na vzorke č.1, je pomerne málo variabilná ($v = 0,59\%$).

Priemerná hodnota porozity vo vzorke č.2 (horizontálne umiestnená) má hodnotu 67,74 %, čo predstavuje oproti vzorke č.1 rozdiel o 7,18 %. Tento údaj naznačuje, že štruktúra pleteniny, resp. jej geometria je pomerne variabilná.

Variačný koeficient porozity na konkrétnej vzorke má opäť nízku hodnotu a to 0,76%.

Horizontálne umiestnená vzorka č. 3 má priemernú hodnotu porozity 65,59 % a variačný koeficient s hodnotou 0,97 %.

Celková priemerná hodnota porozity pleteniny bola vypočítaná ako aritmetický priemer z výsledných hodnôt porozity horizontálne umiestnených vzoriek 1, 2 a 3.

Výsledok nám hovorí, že porozita skúmanej pleteniny má hodnotou 64,63 % a variačný koeficient 5,70 %.

Druhý spôsob upevnenia vzorky predstavoval vertikálne upevnenie na polystyrénovej platničke kolmo vsadenej do CT držiaka. Pletenina sa analyzovala po 1 stĺpiku (6 meraní) a po 2 susedných stĺpikoch (5 meraní) vždy z rovnakého počtu rezov (221) a pri rovnakých hodnotách thresholdu ako pri horizontálnom meraní.

V prvom type merania, kde bol analyzovaný vždy 1 stĺpik pleteniny, má priemerná porozita hodnotu 57,6 % a pri hodnotení 2 susedných stĺpikov hodnotu 56,01 %. Hodnota variačného koeficientu z týchto dvoch meraní predstavuje 1,98 %.

Výsledná hodnota porozity vo vertikálne umiestnenej vzorke je teda 56,81 %. Ako bolo už vyššie uvedené, túto metódu sme nakoniec označili za nepresnú, nakoľko vznikli pri meraní chyby spôsobené nedokonalým upevnením vzorky do držiaka. Preto pokiaľ by sme chceli merať porozitu pletenín vo vertikálnom smere, je nutné precízne zostrojiť nástavec, resp. držiak vzorky, ktorý by na 100% spĺňal podmienku kolmého upevnenia v CT držiaku a bol by vyrobený z málo pohlitivého materiálu pre RTG žiarenie.

Priedušnosť

Prietok vzduchu cez vzorku pleteniny bol meraný na prístroji FX3300. Priemerná hodnota z 30 meraní je 2,5183 [dm³/s].

4.1 Záverečné porovnanie výsledkov porozity

Táto kapitola porovnáva výsledné hodnoty experimentálne zistenej porozity z mikrotomografu Skyscan 1174 a z teoretického výpočtu porozity s experimentálne zistenými vstupnými hodnotami.

Výsledná hodnota porozity zistená z μ CT analýzy má hodnotu 64,63 %. Porozita vyjadrená z objemového zaplnenia predstavuje 70,6 %. Rozdiel medzi týmito hodnotami teda činí 5,97 %. Vzhľadom k variabilite pleteniny predstavuje tento výsledok celkom uspokojivý záver. Avšak osobne zastávam názor, že hodnota porozity získaná pomocou 3D analýzy predstavuje presnejší výsledok ako teoreticky vypočítaná porozita. Predovšetkým preto, že vstupné parametre pleteniny použité na výpočet zaplnenia resp. porozity môžu obsahovať nepresnosti vzniknuté počas čiastkových meraní.

Výhodou 3D analýzy porozity pomocou μ CT oproti teoreticky zisťovanej porozity je taktiež fakt, že nie je potrebné pracne zisťovať parametre ako je:

- hrúbka pleteniny,
- rozteč riadkov a stĺpikov pleteniny, resp. počet stĺpikov a riadkov na 1 cm,
- veľkosť 1 základnej štruktúrnej jednotky pleteniny (očka),
- priemer priadze,
- dĺžku očka.

Preto je analýza pomocou μ CT časovo výhodná. Ďalšiu výhodu predstavuje aj jednoduchá príprava vzoriek pre scanovanie.

Za výslednú hodnotu porozity skúmanej pleteniny je preto možno považovať výsledok z 3D analýzy zrealizovanej z výstupov mikrotomografického zariadenia Skyscan 1174.

5. Záver

Cieľom tejto práce bola charakterizácia mikrotomografických zariadení pre nedeštruktívnu röntgenografiu a ich využitia v textilnej metrológii. Bližšie sa venuje práve fyziologickým vlastnostiam textílií zistených pomocou μ CT a to konkrétne stanoveniu parametra 3D porozity.

Ako predmet experimentu bola zvolená záťažná pletenina z 85% nomexu a 15% kevlaru, používaná na zhotovenie ochranných pracovných rukavíc. Experimentálna práca bola zameraná práve na získanie čo najlepšieho 3D obrazu štruktúry skúmanej pleteniny ako vstupu do 3D analyzačných programov na vyhodnocovanie rôznych parametrov. Následne bola analyzovaná závislosť 3D porozity a priedušnosti materiálu zistenej na prístroji FX3300.

Pri samotnom snímaní obrazu pomocou μ CT sa riešilo niekoľko problémov a to konkrétne:

- podmienky scanovania,
- príprava vzorky – navrhnutie upevnenia textilnej vzorky,
- správne stanovenie Thresholdu,
- výber analyzovanej charakteristiky – porozity,
- samotné vyhodnotenie 3D analýzy.

Na upevnenie textilnej vzorky do CT držiaka boli navrhnuté a použité dve varianty a to:

- horizontálne upevnenie vzorky,
- vertikálne upevnenie vzorky.

Prvá varianta – horizontálne upevnená vzorka, bola následne vyhodnotená ako vhodnejší prístup snímania obrazu v prípade zvolenej pleteniny. Vertikálne upevnená vzorka by bola taktiež vhodná po zlepšení dizajnu držiaka. Za výslednú hodnotu porozity získanej pomocou μ CT je považovaná hodnota získaná práve z horizontálneho prístupu scanovania vzorky.

Percentuálne vyjadrenie objemu vzduchu v skúmanej pletenine získané pomocou 3D analýzy predstavuje 64,63 %. Porozita vyjadrená cez zaplnenie má hodnotu o 5,97 % väčšiu ako z μ CT prístupu. Porozita vyjadrená z objemového zaplnenia teda predstavuje

70,6 %. Vzhľadom k variabilite architektúry pleteniny, je tento výsledok považovaný za pomerne uspokojivý.

Prínosom tejto práce je predovšetkým presnejšia metóda stanovenia porozity materiálu, ktorá je menej pracná a časovo menej náročná ako klasické formy stanovovania porozity. Aj napriek tomu, že proces scanovania môže trvať niekoľko hodín, po spustení scanovania nie je nutné pri prístroji zostávať a samotné spracovanie výsledkov analýzy trvá niekoľko minút. Prínosom je taktiež možnosť spracovávania 3D obrazu v rôznych programoch, či už určených na ďalšiu matematickú analýzu, úpravu vzhľadu nasnímanej pleteniny, alebo grafické výstupy z meraní v podobe obrázkov a animácií. Tieto programy taktiež umožňujú „nahliadnuť“ do vnútornej štruktúry skúmaného materiálu.

Zaujímavým možným výstupom z μ CT je aj ukladanie 3D modelu vo formáte .stl, ktorý je určený napr. na 3D tlač. Na základe priestorovej informácie z tohoto formátu bola zrealizovaná aj 3D tlač modelu pleteniny nasnímanej v horizontálnej polohe, kde bol model zväčšený v mierke 7:1 a 5:1.

3D analýza porozity pleteniny sa ukázala ako vhodná metóda a pomerne presná, je preto možné považovať výsledok z 3D analýzy zrealizovanej z výstupov mikrotomografického zariadenia Skyscan 1174 za alternatívnu metódu na zisťovanie porozity textilných materiálov. Keďže je porozita funkciou priedušnosti, môžeme považovať CT analýzu za novú metódu hodnotenia tejto fyziologickej vlastnosti.

Návrh na ďalší experiment:

Keďže sa v tejto práci už nebolo možné venovať viacerým materiálom, predmetom ďalšieho výskumu by mohlo byť práve experimentálne hodnotenie rôznych druhov pletení, pri ktorých by bola analyzovaná porozita pomocou μ CT a následne testovaná priedušnosť vzduchu cez dané pleteniny. Z týchto dvoch vlastností by bola zjavná miera závislosti porozity a priepustnosti vzduchu skúmaných materiálov.

6. Použitá literatura

- [1] ZAJAC, Juraj. *Röntgenová rádiografia* [online]. Brno, 2010 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/270385/prif_b/Bakalarska_praca.pdf. Bakalárska práca. MASARYKOVA UNIVERZITA. Vedoucí práce doc.RNDr. Petr Mikulík, Ph.D.
- [2] *Nobelovy ceny a rentgenové záření* [online]. 2003 [cit. 2013-05-18]. ISSN 1214-4029. Dostupné z: <http://www.vesmir.cz/clanek/nobelovy-ceny-a-rentgenove-zareni>
- [3] A Remarkable History. *Xradia : Technology* [online]. 2010 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.xradia.com/technology/index.php>
- [4] KAŤUCH, Peter a Jozef ŽIVČÁK. *Priemyselná tomografia. Nový rozmer v metrologii*. Košice, 2010. Dostupné z: <http://www.cttc.sk/podklady/metro2010.pdf>
- [5] VOJTKO, Peter, Igor BROSKA a Robert ŠEVČÍK. *Identifikácia rotácie staurolitu z metapelitov počítačovým mikrotomografom* [online]. Bratislava, 2011 [cit. 2013-05-18]. ISSN 1338-3523. Dostupné z: http://www.geology.sk/doc/min_slov/ms_2011_3/MS_3_2011_08_Vojtko%20et%20al.pdf
- [6] Computed tomography for dimensional metrology. *ScienceDirect: CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2011, roč. 60, č. 2 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850611002083>
- [7] RAMASWAMY, S., M. GUPTA, A. GOEL, U. AALTOSALMI, M. KATAJA, A. KOPONEN a B.V RAMARAO. The 3D structure of fabric and its relationship to liquid and vapor transport. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [online]. 2004, roč. 241, 1-3, s. 323-333 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775704002249>
- [8] PC RTG tomografie - principy: Principy. *XUV.KFE.FJFI.CVUT.CZ: Fyzika a technika RTG záření* [online]. 2009 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://xuv.kfe.fjfi.cvut.cz/fyzika-a-technika-rtg-zareni/pc-rtg-tomografie/55>
- [9] KELEMENOVÁ, PHD, Ing. Tatiana a Ing. Terézia HENRICZYOVÁ. Metrotomografia nástroj na meranie rozmerov tvarovo zložitých súčiastok. In: *AT&P journal* [online]. Košice, 2009 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://www.atpjournal.sk/buxus/docs/casopisy/atp_2009/pdf/atp-2009-09-14.pdf
- [10] *Bruker micro CT: SkyScan1174 compact micro-CT* [online]. 2012 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.skyscan.be/products/1174.htm>
- [11] *Bruker microCT: Applications: material science (5) / SkyScan1174* [online]. 2012 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.skyscan.be/applications/materials/materials005.htm>
- [12] HOWIE, Nicole. *Micro CT Scanning Protocol*. 2012. Dostupné z: <http://www.georgiahealth.edu/institutes/regenerative/Micro%20Ct%20Procedures2.pdf>
- [13] *Manual for SkyScan CT-Analyser v. 1.10*. Belgium, 2010.
- [14] TUAN HO, Saey a Dietmar W. HUTMACHER. A comparison of micro CT with other techniques used in the characterization of scaffolds. *Biomaterials* [online]. 2006, roč. 27, č. 8 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961205007957>
- [15] *Bruker microCT: Realistic visualization by volume rendering* [online]. 2012 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.skyscan.be/products/ctvox.htm>

- [16] HORNÍČEK, Petr. *Odvod vlhkosti a tepla z povrchu lidského těla*. Liberec, 2002. Dostupné z: http://www.kod.tul.cz/predmety/STE/dalsi_podklady/Odvod%20vlhkosti%20a%20tepla.pdf. Podklady STE. TUL.
- [17] STÄMPFLI, Rolf, Paul A. BRÜHWILER, Ivo RECHSTEINER, Veronika R. MEYER a René M. ROSSI. X-ray tomographic investigation of water distribution in textiles under compression – Possibilities for data presentation. *Measurement* [online]. 2013, roč. 46, č. 3, 1212–1219 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224112004307>
- [18] HOM, Hung. Thermal Manikins and Modelling. In: *Lboro* [online]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2006 [cit. 2013-05-18]. ISBN 962-367-534-8. Dostupné z: [http://www.lboro.ac.uk/microsites/lds/EEC/ICEE/textsearch/manikin%20meeting%202006/2nd%20publish%20Proceeding_all-in-one\[061005\]rev02.pdf](http://www.lboro.ac.uk/microsites/lds/EEC/ICEE/textsearch/manikin%20meeting%202006/2nd%20publish%20Proceeding_all-in-one[061005]rev02.pdf)
- [19] VIZUALIZACE - RENDERING: KPC. *Kod.tul* [online]. 2012 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://www.kod.tul.cz/predmety/konstrukce/KPC/dokumenty/03_prednaska_2_cast.pdf
- [20] KAJIYA, James T. RENDERING FUR WITH THREE DIMENSIONAL TEXTURES. *Computer graphics* [online]. 1989, roč. 23, č. 3 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://delivery.acm.org/10.1145/80000/74361/p271-kajiya.pdf?ip=147.230.157.84&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=C2716FEBFA981EF18151B7E648C640046CE5E4A1C6ABD17F&CFID=330828017&CFTOKEN=61088781&_acm_=1368894428_9a7704c85310533aa91076731a86b52f
- [21] ZHAO, Shuang, Wenzel JAKOB, Steve MARSCHNER a Kavita BALA. Building Volumetric Appearance Models of Fabric using Micro CT Imaging. *Delivery.acm* [online]. 2011, roč. 30, č. 4 [cit. 2013-05-18]. DOI: 10.1145/1964921.1964939. Dostupné z: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1964939&bnc=1>
- [22] SHINOHARA, Toshihiro. Expression of Individual Woven Yarn for Structure Analysis of Textile Fabric Based on Fuzzy Clustering of Three Dimensional CT Image. *Ieeexplore* [online]. Japan, 2011 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=06119651&tag=1>
- [23] SHINOHARA, T., J. y. TAKAYAMA, S. OHYAMA a A. KOBAYASHI. Extraction of Yarn Positional Information from a Three-dimensional CT Image of Textile Fabric using Yarn Tracing with a Filament Model for Structure Analysis. *Textile Research Journal* [online]. 2010-04-16, vol. 80, issue 7, s. 623-630 [cit. 2013-05-18]. DOI: 10.1177/0040517509342320. Dostupné z: <http://trj.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0040517509342320>
- [24] VANAERSCHOT, Andy, Brian N. COX, Stepan V. LOMOV a Dirk VANDEPITTE. Stochastic framework for quantifying the geometrical variability of laminated textile composites using micro-computed tomography. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2013, č. 44, 122–131 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X12002606>
- [25] DESPLENTERE, F., S.V. LOMOV, D.L. WOERDEMAN, I. VERPOEST, M. WEVERS a A. BOGDANOVICH. Micro-CT characterization of variability in 3D textile architecture. *Composites Science and Technology* [online]. 2005, Volume 65, č. 13, 1920–1930 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353805000989>
- [26] P. Tan, L. Tong, G.P. Steven. Modelling for predicting the mechanical properties of textile composites – a review *Compos Part A – Appl Sci Manuf*, 28 (11) (1997), pp. 903–922
- [27] FERRAZ, Eduardo Gomes, Lucio Costa Safira ANDRADE, Aline RODE DOS SANTOS, Vinicius Rabelo TORREGROSSA, Maria do Rosario Santos FREIRE a Viviane Almeida SARMENTO. Effect of different surface processing protocols in three-dimensional images for rapid prototyping. *Advances in Engineering Software* [online]. 2011, Volume 48, Issue 8, 332–

- 335 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997811000263>
- [28] TUAN HO, Saey a Dietmar W. HUTMACHER. A comparison of micro CT with other techniques used in the characterization of scaffolds. *Biomaterials* [online]. 2006, Volume 27, Issue 8, 1362–1376 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961205007957>
- [29] LIZÁK, Pavol, Jela LEGERSKÁ a Ľubica MRVOVÁ. SOFTWAREOVÁ ANALÝZA MERANIA PÓROVITOSTI TEXTÍLIÍ. In: *Chemické listy 104* [online]. 2010 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2010_06_560-565.pdf
- [30] DuPont Personal Protection: Ochranné rukavice DuPont proti tepelným rizikům. *Dpp-europe* [online]. 2013 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.dpp-europe.com/-Ruce-a-zap-sti,2826-.html>
- [31] Pracovní rukavice poskytující ochranu před mechanickými riziky. *Safework* [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.safework.cz/norma-en-388-2003/>
- [32] KOVÁŘ, Radko, Prof. Ing. CSc. *STRUKTURA A VLASTNOSTI PLOŠNÝCH TEXTILIÍ*. Liberec. Dostupné z: <https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2003-02-17/11-54-33.pdf>
- [33] Neckář, B.: Morfologie a strukturní mechanika vláknenných útvarů, TU v Liberci, 1998.
- [34] Havrdová, M.: Příspěvek k hodnocení prodyšnosti oděvních tkanin, Disertační práce, TU v Liberci, 2004.
- [35] Ogulata R. T., Mavruz S.; Investigation of Porosity and Air Permeability Values of Plain Knitted Fabrics. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe* 2010, Vol. 18, No. 5 (82) pp. 71-75.
- [36] Hes L., Sluka P.: Úvod do komfortu textilií, skripta TU Liberec, 2005. 109 str., ISBN 80-7083-926-0
- [37] ČSN EN 12127 (80 0849). *Textilie - Plošné textilie - Zjišťování plošné hmotnosti pomocí malých vzorků*.
- [38] FLÉGLOVÁ ING., Zuzana. Omak plošných textilií: KES Kawabata Evaluation System. *Kod.tul* [online]. Liberec, 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.kod.tul.cz/predmety/STE/dalsi_podklady/STE-06-KES_omak.pdf
- [39] PEIRCE, F. T. (1947) Geometrical Principles Applicable to Design of Functional Fabrics, *Textile Research Journal*, xvii.
- [40] HATCH, K. L., WOO, S. S., BARKER, R. L., RADHAKRISHNAIAH, P., MARKEE, N. L. & MAIBACH, H. I. (1990) In Vivo Cutaneous and Perceived Comfort Response to Fabric. Part I: Thermophysiological Comfort Determinations for Three Experimental Knit Fabrics, *Textile Research Journal*, 405–412.

7. Zoznam použitých obrázkov:

Obr. 1 W.C. Röntgen a jedna z jeho prvých X-ray snímiek zobrazujúca kosti ruky jeho manželky aj so snubným prsteňom [3]	12
Obr. 2 rôzne prístroje na skúmanie vnútorných a vonkajších štruktúr [6]	14
Obr. 3 zobrazenie súčiastok s neprístupnými vnútornými komponentami pomocou μ CT [6].....	14
Obr. 4 prvý komerčný počítačový tomograf Siretom firmy Siemens z roku 1974 a Metrotom 1500 (Carl Zeiss) ako reprezentant najnovších počítačových tomografov určených pre priemysel [4].....	18
Obr. 5 Možnosti metrotomografie: diagnóza z röntgenogramov, virtuálna separácia materiálov, nedeštrukčné prerezovanie objektom, analýza pórovitosti, tvarová analýza pri porovnaní s CAD dátami [4]	19
Obr. 6 Princíp subpixelizácie [4]	20
Obr. 7 SkyScan 1174 X-ray micro-CT	21
Obr. 8 ilustračný obr. z programu Data Viewer : syntetická tkanina scanovaná prístrojom SkyScan 1174 - 3 orthogonálne virtuálne rezy , veľkosť voxelov 6 μ m [11].....	22
Obr. 9 3D vizualizácia mikroštruktúry vzorky vytvorená programami CTan+CTvol [11].....	22
Obr. 10 ikony pre 5 hlavných operácií v programe CTan	24
Obr. 11 príkazy analyzačného menu.....	26
Obr. 12 ukážka výstupu individuálnej 2D analýzy	26
Obr. 13 ukážka výstupu individuálnej 3D analýzy	27
Obr. 14 ukážka výstupu 3D analýzy	27
Obr. 15 pracovné prostredie programu CTvox – 3D model pleteniny skúmanej v tejto práci	28
Obr. 16 Držiak vzorky pre X-ray tomografiu textílií s tryskou na simuláciu potenia. Je možné dodať aj určitý tlak za pomoci piestu a skrutky [17].....	30
Obr. 17 3D distribúcia vody v priebehu času. Textília ponožky je zobrazená modrou farbou, laminát topánky červenou farbou. Pre ilustráciu bola vybraná ľubovoľná oblasť s nasýtením vody v pevnom objeme v hodnote 0,5. Oblasti s nižším nasýtením nie sú viditeľné. [17]	31
Obr. 18 proces tvorby objemového modelu vzhľadu textílie [21].....	32
Obr. 19 CT snímka priečného rezu jednolícnej pleteniny [22].....	33
Obr. 20 CT snímka priečného rezu tkaniny s plátňovou väzbou [23]	33
Obr. 21 vzorka jednolícnej pleteniny a tkaniny s plátňovou väzbou zobrazená technikou objemového renderovania za použitia jej originálnych CT snímok [23].....	34
Obr. 22 Samostatná priadza zobrazená technikou objemového renderovania [22].....	34
Obr. 23 priečne rezy kompozitov zhotovené pomocou μ CT.....	36
Obr. 24 WiseTex modely rôznych 3D textílií.....	36
Obr. 25 (A-D) sú 3D modely scaffoldu 1, (E-H) patria scaffoldu 2, (A) a (E) – izometrický pohľad, (B) a (D) – pohľad zhora. Veľkosť „medzier“ – (C) a (G), na (D) a (H) vidíme veľkosť priemeru stien [28]	38
Obr. 26 PLGA pletenina na A bola hodnotená pomocou mikro CT skenovania ; 3D modely (B-D) ; Izometrický (B), bočný (C), a pohľad z vrchu. Na (E) vidíme vypočítané plochy rezov. Obdĺžnik približuje samotné filamenty scaffoldu. [14]	41
Obr. 27 ochranná pracovná rukavica OVENBIRD	42
Obr. 28 norma EN 407 – legenda k číselnému hodnoteniu [31]	43

Obr. 29 norma EN 388 - legenda k číselnému hodnoteniu [31]	44
Obr. 30 model záťažnej jednolícnej pleteniny [32]	44
Obr. 31 stavebné prvky očka pleteniny [33].....	45
Obr. 32 štvorcová časť pleteniny – hustota riadkov a stĺpikov [33].....	45
Obr. 33 štruktúrna jednotka pleteniny (žltý obdĺžnik).....	46
Obr. 34 ukážka textilného vlákenného útvaru v pomyselnej kocke	48
Obr. 35 model záťažnej pleteniny a detail na plochu póru v štruktúrnej jednotke pleteniny [35]	51
Obr. 36 prístroj na meranie priedušnosti FX3300	52
Obr. 37 nástavec na upevnenie vzorky a princíp otáčania vzorky v μ CT Skyscan117455	
Obr. 38 horizontálne upevnená vzorka pleteniny v držiaku a snímka z CT vo formáte TIFF	56
Obr. 39 VOI – volume of interest („objem záujmu“)	57
Obr. 40 zrekonštruované rezy pleteniny	57
Obr. 41 prvý a posledný aktívny rez pleteniny a aplikácia kruhového ROI.....	58
Obr. 42 kruhové ROI aplikované na všetky vybrané rezy.....	58
Obr. 43 prahovanie obrazu – určovanie threshold hodnôt.....	59
Obr. 44 porovnanie maprahovalých a „surových“ obrazov	59
Obr. 45 ikona pre 3D analýzu	60
Obr. 46 nastavenie hodnôt, ktoré majú byť analyzované	60
Obr. 47 výsledky 3D analýzy	61
Obr. 48 3D analýza jednej štruktúrnej jednotky pleteniny	62
Obr. 49 kruhová oblasť záujmu ROI aplikovaná na všetkých zvolených rezoch – 5 meraní	63
Obr. 50 polygómová oblasť záujmu ROI aplikovaná na všetkých zvolených rezoch – 5 meraní	64
Obr. 51 vertikálne upevnená vzorka pleteniny	71
Obr. 52 vybraný vertikálny VOI – objem záujmu (Volume Of Interest)	72
Obr. 53 postup spracovania obrazov v CTan.....	73
Obr. 54 vizuálne porovnanie ROI v surovom obraze s obrazom binárnym	74
Obr. 55 výber dvoch stĺpikov pleteniny.....	75
Obr. 56 8 rôznych rezov pleteniny – sledujeme rôznu 2D porozitu.....	78
Obr. 57 3D modely uložené vo formáte .stl a zobrazené v programe CTvox a následný výstup pomocou rapid prototyping	79
Obr. 58 jeden z prístrojov systému KES – meranie hrúbky plošnej textílie [38].....	82
Obr. 59 rozteč stĺpikov a riadkov meraná na rôznych úsekoch pleteniny pomocou Nis – Elements.....	83
Obr. 60 rozmery 1 štruktúrnej jednotky pleteniny (Nis – Elements).....	84
Obr. 61 meranie efektívneho priemeru priadze na obrazovej analýze	85
Obr. 62 meranie dĺžky jedného očka pleteniny pomocou Nis - Elements.....	87
Obr. 63 určovanie hodnoty thresholdu	89
Obr. 64 vzťah medzi predikovanou priedušnosťou a veľkosťou pórov [35].....	92
Obr. 65 Obr. 66 morfometrická analýza objektov 3D	103
Obr. 67 morfometrická analýza objektov 2D	104
Obr. 68 rez nomexovou a kevlarovou niťou – rastrovací mikroskop	106
Obr. 69 ovládacie prvky prístroja FX3300	107
Obr. 70 3D model pleteniny – možnosť ľubovoľného pohybu modelu a efektov	108
Obr. 71 využitie funkcie „cutting“	108
Obr. 72 vytváranie animácií – flight recorder.....	109
Obr. 73 3D model pleteniny vo formáte .stl – zobrazený v programe CTvol	109

8.Prílohy

8.1 Príloha A

3D integrated analysis of all objects in VOI (all selected image levels)			3D individual analysis of all objects in the VOI (over all selected image levels)		
Parameter	Symbol	Unit	Parameter	Symbol	Unit
VOI volume	TV	mm ³	Object volume	Obj.V	mm ³
Object volume	Obj.V	mm ³	Object surface	Obj.S	mm ³
Percent object volume	Obj.V/TV	%	Volume of pores	Po.V	mm ³
VOI surface	TS	mm ²	Porosity	Po	%
Object surface	Obj.S	mm ²	Number of pores	N.Po	
Intersection surface	i.S	mm ²	Centroid x	Crd.X	mm
Object surface / volume ratio	Obj.S/Obj.V	mm ⁻¹	Centroid y	Crd.Y	mm
Object surface density	Obj.S/TV	mm ⁻¹	Centroid z	Crd.Z	mm
Fragmentation index	Fr.I	mm ⁻¹			
Centroid (x)	Crd.X	mm			
Centroid (y)	Crd.Y	mm			
Centroid (z)	Crd.Z	mm			
Structure model index	SMI				
Structure thickness	St.Th	mm			
Structure linear density	St.Li.Dn	mm			
Structure separation	St.Sp	mm ⁻¹			
Degree of anisotropy	DA				
Eigenvalue 1					
Eigenvalue 2					
Eigenvalue 3					
Fractal dimension	FD				
Number of objects	N.Obj				
Number of pores	N.Po				
Volume of pores	V.Po	mm ³			
Percent porosity	Po	%			

Default results filename	[prefix]_3D.txt	Default results filename	[prefix]_i3D.txt
	[prefix]_3D.csv		[prefix]_i3D.csv

Obr. 65 Obr. 66 morfometrická analýza objektov 3D

2D integrated analysis of all objects in VOI (all selected image levels, line-by-line)			2D individual analysis of all objects in the ROI (from the single current image level only)		
Parameter	Symbol	Unit	Parameter	Symbol	Unit
VOI volume	TV	mm ³	Area	Ar	mm ²
Object volume	Obj.V	mm ³	Perimeter	Pm	mm
Percent object volume	Obj.V/TV	%	Form factor	FF	
VOI surface	TS	mm ²	Euler number	EN	
Object surface	Obj.S	mm ²	Porosity	Po	%
Object surface / volume ratio	Obj.S/Obj.V	mm ⁻¹	Extent	Ext	
Mean total crosssectional ROI area	T.Ar	mm ²	Orientation	Or	°
Mean total crosssectional ROI perimeter	T.Pm	mm	Eccentricity	Ecc	
Mean total crosssectional object area	Obj.Ar	mm ²	Centroid x		mm
Mean total crosssectional object perimeter	Obj.Pm	mm	Centroid y		mm
Mean number of objects per slice	Obj.N		Moments of inertia x	MMIx	mm ⁴
Average object area per slice	Av.Obj.Ar	mm ²	Moments of inertia y	MMIy	mm ⁴
Average object size per slice	Av.Obj.Sz	mm	Polar Moment of inertia	MMIp	mm ⁴
Mean polar moment of inertia	MMI(polar)	mm ⁴	Product of inertia	pl	mm ⁴
Mean eccentricity	Ecc		Major axis	Ma	mm
Crosssectional thickness	Cs.Th	mm	Minor axis	Mi	mm
Structure thickness (plate model)	St.Th(pl)	mm	Length	Le	mm
Structure separation (plate model)	St.Sp(pl)	mm	Mean Thickness	Av.Th	mm
Structure linear density (plate model)	St.Li.Dn(pl)	mm ⁻¹			
Structure diameter (rod model)	Tb.Dm(rd)	mm			
Structure separation (rod model)	Tb.Sp(rd)	mm			
Structure linear density (rod model)	St.Li.Dn(rd)	mm ⁻¹			
Mean fragmentation index	Fr.I	mm ⁻¹			
Percent porosity	Po	%			
Centroid (x)	Crd.X	mm			
Centroid (y)	Crd.Y	mm			
Centroid (z)	Crd.Z	mm			
Mean fractal dimension	FD				
Total intersection surface	i.S	mm ²			

Default results filename	[prefix]_2D.txt	Default results filename	[prefix]_3D.txt
	[prefix]_2D.csv		[prefix]_3D.csv

Obr. 67 morfometrická analýza objektov 2D

8.2 Príloha B

Norma EN 407

Tab. 21 norma EN 407 - vysvetlivky k číselnej legende [31]

VLASTNOSTI	úroveň 1	úroveň 2	úroveň 3	úroveň 4
Chovanie pri horení (doba samovoľného horenia v s)	≤ 20	≤ 10	≤ 3	≤ 2
Chovanie pri horení (doba dožehu v s)	bez požiadavky	≤ 120	≤ 25	≤ 5
Kontaktné teplo (kontaktná teplota T_c °C)	100	250	350	500
Kontaktné teplo (najnižšia hodnota t, s)	≥ 15	≥ 15	≥ 15	≥ 15
Konvekčné teplo (index prenosu tepla HTI)	≥ 4	≥ 7	≥ 10	≥ 18
Sálavé teplo (prenos tepla t 24 s)	≥ 7	≥ 20	≥ 50	≥ 95
Malé odstreky roztaveného kovu (počet kvapôčiek)	≥ 10	≥ 15	≥ 25	≥ 35
Veľké množstvo roztaveného kovu (roztavené Fe v g)	30	60	120	200

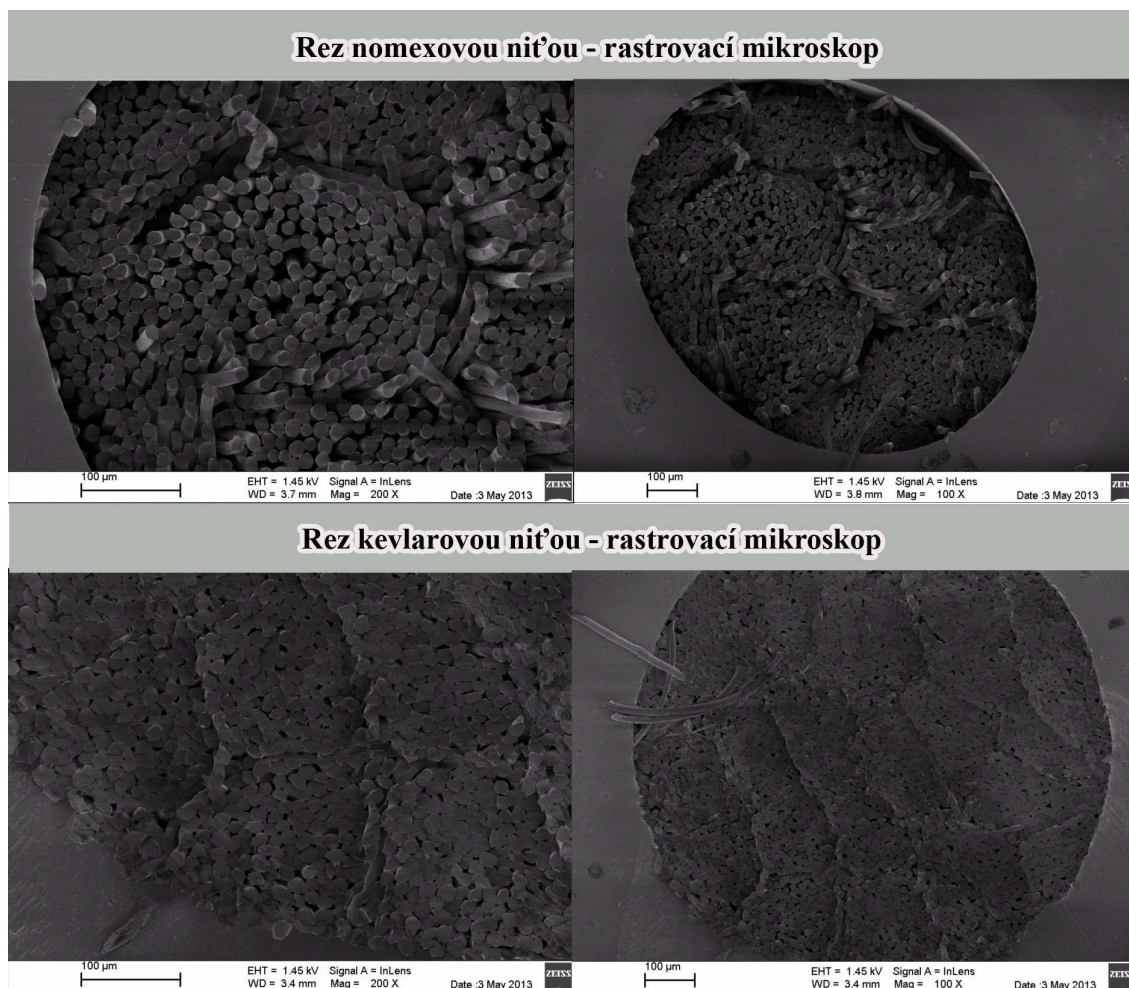
Norma EN 388

Tab. 22 norma EN 388 - vysvetlivky k číselnej legende [31]

Test	Hodnocení úrovně výkonu					
	0	1	2	3	4	5
a. Odolnost proti oděru (cykly)	< 100	100	500	2000	8000	-
b. Odolnost proti prořezání (faktor)	< 1,2	1,2	2,5	5,0	10,0	20,0
c. Odolnost proti protržení (Newton)	< 10	10	25	50	75	-
d. Odolnost proti propíchnutí (Newton)	< 20	20	60	100	150	-

8.3 Príloha C

Rez nomexovou a kevlarovou nit'ou zhotovený pomocou rastrovacieho mikroskopu.



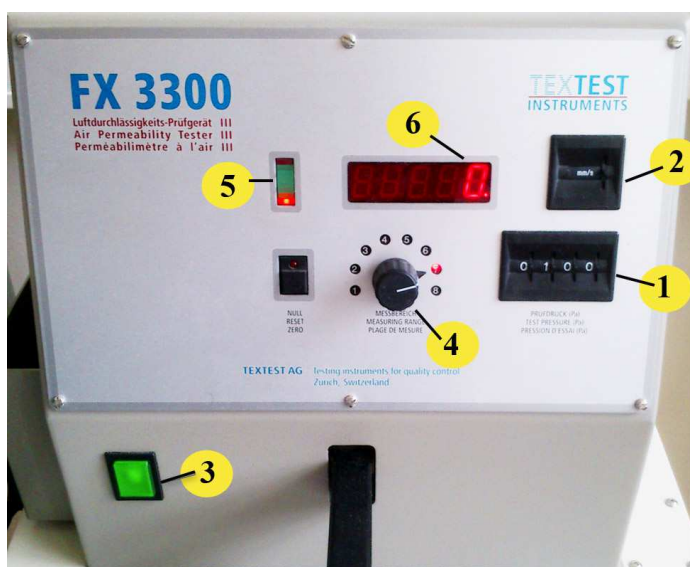
Obr. 68 rez nomexovou a kevlarovou nit'ou – rastrovací mikroskop

8.4 Príloha D

Postup merania priedušnosti vzduchu plošných textílií na prístroji FX3300

(na obr. X sú vyznačené jednotlivé ovládače)

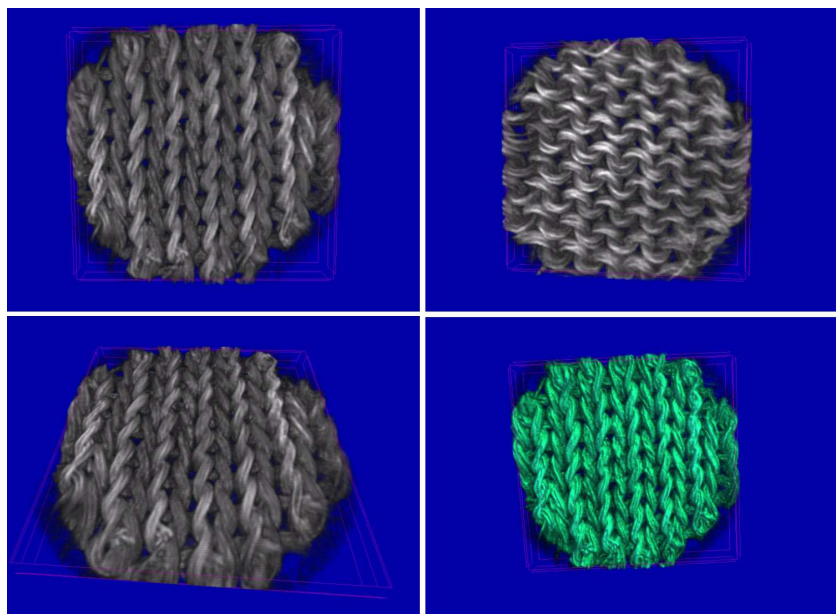
1. **zvoliť meranú plochu** – v našom prípade 20cm²
2. **zvoliť požadovaný tlakový spád** – ovládač 1
3. **zvoliť jednotky merania** – ovládač 2
4. **zapnúť prístroj** – meriace zariadenie sa aktivuje hlavným vypínačom 3 (asi po 10 sekundách je prístroj pripravený na meranie)
5. **upnúť meranú vzorku** – bez skladov, napätia, záhybov, pokrčených miest a švov cez meraciu hlavu
6. **spustiť meranie** – stlačením upínacieho ramena do najnižšej polohy – automaticky sa spustí prúdenie vzduchu
7. **zvoliť merací rozsah** – ovládačom rozsahu 4 je nutné vybrať rozsah merania tak, aby sa farebný indikátor 5 stabilizoval v niektorej zo zelených zón
8. **odčítanie výsledku merania** – po ustálení je možné odčítať výsledok - výsledok sa zobrazí na displeji 6
9. **ukončenie skúšky**: po opätovnom zatlačení na upínacie rameno sa automaticky nadvihne a zastaví sa prívod vzduchu, tým pádom je skúška ukončená



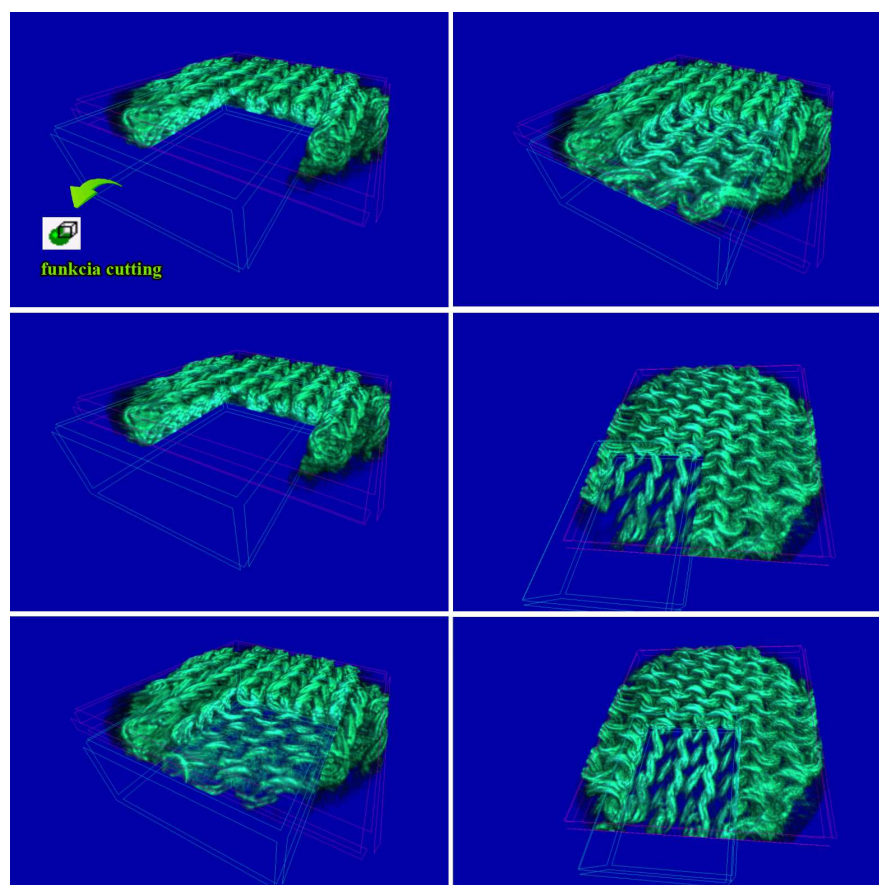
Obr. 69 ovládacie prvky prístroja FX3300

8.5 Príloha E

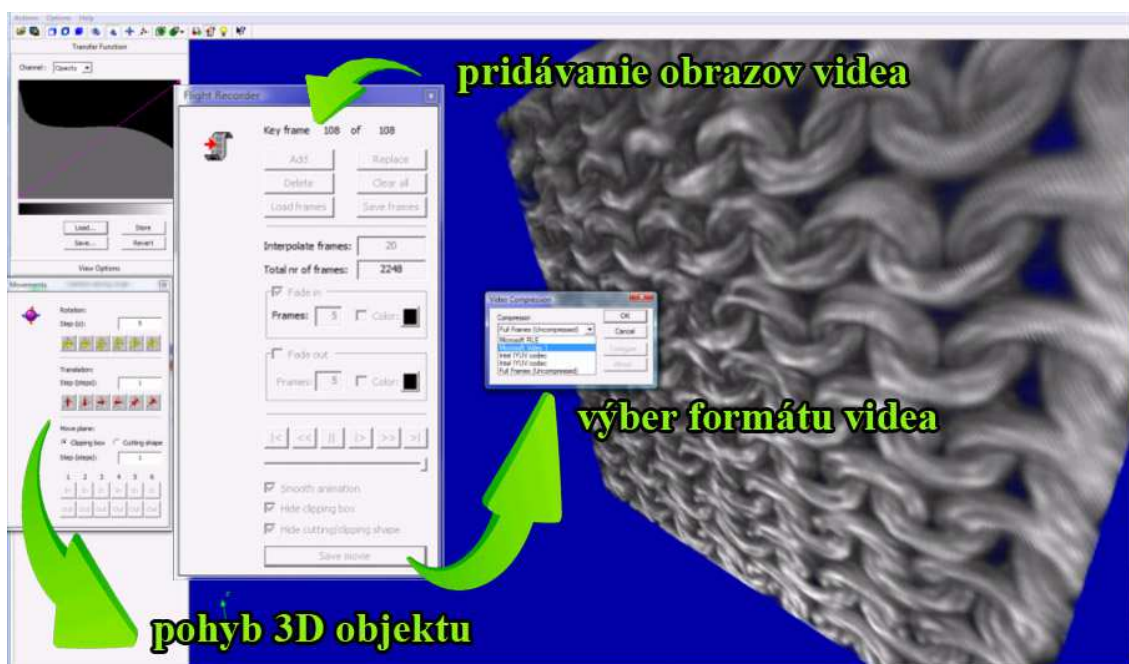
CT vox



Obr. 70 3D model pleteniny – možnosť ľubovoľného pohybu modelu a efektov

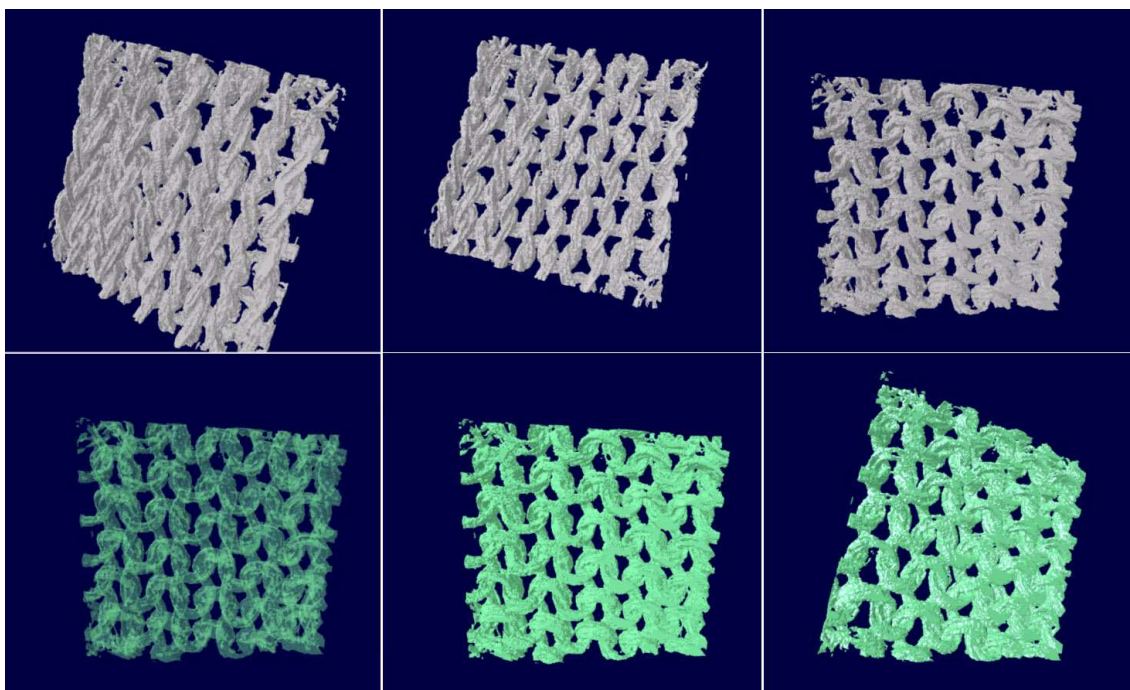


Obr. 71 využitie funkcie „cutting“



Obr. 72 vytváranie animácií – flight recorder

CT vol



Obr. 73 3D model pleteniny vo formáte .stl – zobrazený v programe CTvol

8.6 Príloha F

Plošná hmotnosť pleteniny:

Tab. 23 Plošná hmotnosť vzorky v [g] s rozmermi 10x10 cm

j	hmotnosť [g]
1	4,276
2	4,0052
3	4,1196
4	4,2736
5	4,0012
6	4,116
7	4,2732
8	4,0028
9	4,1168
10	4,2724
Σ	41,4568
\bar{x}	4,1457
s	0,1198
v	2,8888

Hrúbka pleteniny:

Tab. 24 namerané hodnoty hrúbky pleteniny

č.merania	hrúbka T0 [mm]
1	3,290
2	3,080
3	2,950
4	3,150
5	2,970
6	2,950
Σ	18,390
\bar{x}	3,065
s	0,137
v	4,463

Počet stĺpikov a riadkov na 1 cm:

Tab. 25 Počet stĺpikov a riadkov na 1 cm zmeraný pomocou Nis-Elements

počet stĺpikov na určitú dĺžku	prepočet na 1 cm	počet riadkov na určitú dĺžku	prepočet na 1 cm
4 s / 10,58 [mm]	3,781 s/cm	6 r / 14,19 [mm]	4,228 r/cm
3 s / 9,07 [mm]	3,308 s/cm	5 r / 12,32 [mm]	4,058 r/cm
3 s / 9,11 [mm]	3,293 s/cm	5 r / 12,09 [mm]	4,136 r/cm
4 s / 11,20 [mm]	3,57 s/cm	6 r / 14,68 [mm]	4,087 r/cm
priemerný počet stĺpikov na 1 cm	3,488 s/cm	priemerný počet riadkov na 1 cm	4,127 r/cm

Rozmery 1 základnej štruktúrnej jednotky pleteniny zmerané pomocou optickej analýzy:

Tab. 26 rozmery 1 štruktúrnej jednotky pleteniny

Rozmery 1 štruktúrnej jednotky pleteniny		
č. merania	šírka stĺpika [mm] (b)	šírka riadku [mm] (a)
1	2,52	2,51
2	2,48	2,34
3	3,24	2,43
4	2,99	2,21
5	2,99	2,39
6	2,91	2,48
7	3,37	2,38
8	2,88	2,30
9	3,28	2,44
10	3,20	2,33
Σ	29,860	23,810
\bar{x}	2,986	2,381
s	0,304	0,090
v	10,197	3,769

Efektívny priemer priadze:

Tab. 27 namerané hodnoty efektívneho priemeru priadze

č.merania	ef. Priemer priadze d [mm]
1	0,83
2	0,82
3	0,86
4	0,88
5	0,85
6	0,9
7	0,84
8	0,84
9	0,85
10	0,86
11	0,85
12	0,93
13	0,77
14	0,78
15	0,81
16	0,78
17	0,87
18	0,83
19	0,84
20	0,85
21	0,84
Σ	17,6800
\bar{x}	0,8419
s	0,0380
v	4,5170

Dĺžka jedného očka pleteniny (optická analýza):

Tab. 28 hodnoty dĺžky očka merané pomocou Nis - Elements

č.merania	dĺžka očka l [mm]
1	10,99
2	11,18
3	11,51
4	11,69
5	11,22
6	10,65
7	11,29
8	11,46
9	12,1
10	11,59
Σ	113,6800
\bar{x}	11,3680
s	0,3999
v	3,5176

Optická porozita (Nis – Elements):

Tab. 29 hodnoty optickej porozity

č. merania	optická porozita p_o [%]
1	9,1
2	6,72
3	10
4	9,45
5	8,34
6	9,3
7	11,76
8	10,1
9	12,22
10	10,7
Σ	97,690
\bar{x}	9,769
s	1,602
v	16,403

Prietok vzduchu cez pleteninu:

Tab. 30 hodnoty prietoku vzduchu cez vzorku pleteniny

č. merania	prietok vzduchu [dm ³ /s]
1	3,12
2	2,52
3	2,82
4	2,67
5	2,62
6	2,48
7	2,77
8	2,7
9	2,83
10	2,64
11	2,34
12	2,55
13	2,82
14	2,62
15	2,55
16	2,56
17	2,76
18	2,51
19	2,37
20	2,27
21	2,41
22	2,3
23	2,36
24	2,2
25	2,37
26	2,45
27	2,23
28	2,23
29	2,24
30	2,24
Σ	75,5500
\bar{x}	2,5183
s	0,2281
v	9,0575